

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

ZVYŠOVÁNÍ VNITŘNÍ JAKOSTI INGOTŮ A NÁSLEDNÝCH VÝKOVKŮ Z NÁSTROJOVÝCH OCELÍ

DOKTORSKÁ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Studijní program: **Metalurgie**

Obor: **Metalurgická technologie**

Školitel: **Prof. Ing. Jiří Bažan, CSc.**

Ostrava 2011

Ing. Pavel FILA

OBSAH

1. ÚVOD	5
2. VÝROBA VELKÝCH INGOTŮ Z NÁSTROJOVÝCH OCELÍ.....	6
2.1 Vnitřní vady ingotů z nástrojových ocelí	6
2.2 Kvalifikace osových vad výkovků z nástrojových ocelí.....	9
2.3 Možnosti eliminace osových vad (trhlin, dutin, necelistvostí) ingotů.....	10
2.3.1 Technologie odlévání ingotů	10
2.3.2 Typ a vlastnosti odlévané oceli	11
2.3.2.1 Náchylnost ocelí ke vzniku prasklin a trhlin	11
2.3.2.2 Teplota lití oceli.....	12
2.3.2.3 Rychlost lití oceli.....	14
2.3.2.4 Velikost a tvar ingotu	14
3. SIMULACE PODMÍNEK ODLÉVÁNÍ A TUHNUTÍ.....	16
3.1 Přehled simulačních programů	16
3.2 Způsoby řešení zadaných tepelných úloh	18
3.3 Numerická podstata programu MAGMASoft®	20
3.4 Základní parametry pro numerickou simulaci lití a tuhnutí.....	21
4. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	23
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – NUMERICKÉ SIMULACE	24
5.1 Procesní parametry simulace lití a tuhnutí oceli.....	24
5.1.1 Teplota lití oceli.....	25
5.1.2 Rychlost lití ingotu	26
5.1.3 Ošetření hlavy ingotu	27
5.2 Simulace základní – původní stav výroby ve ŽŽAS, a.s.	27
5.3 Simulace vlivu úpravy licích podmínek – změna licí rychlosti	29
5.4 Simulace vlivu objemu tekutého kovu v hlavovém nástavci kokily	30
5.5 Varianty úprav geometrie původního tvaru kokily 8K8,4.....	32
5.5.1 Zesílení dolní poloviny těla kokily	32
5.5.2 Zesílení horní poloviny těla kokily.....	32
5.5.3 Žebrovaní dolní poloviny těla kokily	33
5.5.4 Žebrovaní horní poloviny těla kokily	34
5.5.5 Zkosení patní části uvnitř kokily	35
5.5.6 Změna poměru H/D (výška ingotu / střední průměr)	35
5.5.7 Změna úkosu kokily	36
5.6 Verze zvětšení patního průměru a modifikace průřezu ingotu	37
5.7 Verze návrhu nové kokily 8K9,2	41
6. ZHODNOCENÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ.....	52
7. VÝSLEDNÝ NÁVRH = NOVÝ TYP INGOTU.....	54
7.1 Návrh těla nové kokily 8K9,2.....	54
7.2 Návrh hlavy nové kokily 8K9,2.....	55
8. STANOVENÍ ÚPRAV TECHNOLOGIE VÝROBY	57
8.1 Podmínky odlévání ingotu 8K9,2.....	57
8.2 Izolační obklad pro kokilu 8K9,2	58

9. OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ na ingotech	60
9.1 Chemické složení ocelí	60
9.2 Struktura ingotu 8K8,4 vs. 8K9,2.....	60
9.3 Kapilární zkoušky	61
9.4 Hodnocení makrostruktury oceli hlubokým leptáním	64
9.5 Chemická heterogenita ingotů	65
9.5.1 Heterogenita ingotů jakosti X40CrMoV51 (TD1, TD2, TD3, TD6)	65
9.5.2 Heterogenita ingotu jakosti 8Cr3SiMoV (TD7).....	71
9.5.3 Heterogenita ingotu jakosti 90MnCrV8 (TD8)	73
9.6 Shrnutí výsledků hodnocení vnitřní jakosti ingotů.....	75
10. OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ NA VÝKOVČÍCH	78
11. ZÁVĚR	80
12. SHRUTÍ.....	82
13. SUMMARY	83
14. LITERATURA	84
15. PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA	88
15.1Zahraniční publikace.....	88
15.1.1 Články v odborných periodikách	88
15.1.2 Články ve sbornících z konferencí.....	88
15.2Tuzemské publikace.....	89
15.2.1 Články v odborných periodikách	89
15.2.2 Články ve sbornících z konferencí.....	89
15.3Chráněné průmyslové vzory	92
15.4Řešené projekty	93

Seznam použitých zkratek a symbolů

EOP	- Elektrická oblouková pec	
LF	- Ladle Furnace, pánvová pec	
VD	- Vacuum Degassing, vakuové odplynění	
VOD	- Vacuum Oxygen Decarburization, vakuové oxidační oduhličení	
NO	- nástrojové oceli	
m	- hmotnost ingotu	[kg]
D _{P1}	- vnější patní průměr těla ingotu	[mm]
D _{P2}	- vnitřní patní průměr těla ingotu	[mm]
D _{PS}	- střední patní průměr těla ingotu	[mm]
D _{H1}	- vnější hlavový průměr těla ingotu	[mm]
D _{H2}	- vnitřní hlavový průměr těla ingotu	[mm]
D _{HS}	- střední hlavový průměr těla ingotu	[mm]
D _S	- střední průměr těla ingotu	[mm]
H ₁	- výška těla ingotu	[mm]
S	- štiřlost těla ingotu	[-]
u	- úkos těla ingotu	[%]
k	- konicita těla ingotu	[%]
1/2V	- poloviční V konicita	[°]
FEM	- metoda konečných prvků	
FDM	- metoda konečných diferencí	
TD	- označení tavby	

1. ÚVOD

V hutním průmyslu a metalurgii jsou v současné době kladeny stále vyšší požadavky nejen na zvyšování produktivity a snižování nákladů, ale samozřejmě a to především na zvyšování kvality vyráběné produkce. Produktivita a náklady jsou dva úzce provázané pojmy, jejichž úroveň lze dnes z převážné části úspěšně ovlivňovat a řídit především volbou používaného výrobního zařízení případně jeho intenzifikacemi a samozřejmě cenami používaných vstupních surovin a energií. Naproti tomu kvalita výroby je dnes dána především vyspělostí výrobních technologií a používaných výrobních postupů. V této souvislosti je mimochodem velmi často, za účelem dodržení vysokých kvalitativních parametrů požadovaných zákazníkem, běžnou úroveň nákladů výrobku nutno i překračovat.

Problematika kvality je tím důležitější, čím jakostnější výrobky jsou z oceli vyráběny. Kvalita je určena především typem oceli, tj. obsahem legujících prvků včetně obsahu nežádoucích stopových prvků, znečištěním oceli plyny nebo jinými nečistotami (vměstky) společně se způsobem rozmístění těchto nečistot, ale také nepochybně strukturou oceli. Kvalita polotovaru (ingotu, bramy, předlitku, ...) je dále určena především podmínkami odlévání a tuhnutí oceli. Kvalita výkovku, vývalku, je pak dále ovlivněna především technologickým postupem tváření a tepelným zpracováním.

Problematikou, které je věnována hlavní pozornost v dizertační práci, je kvalita ingotů z vybraných druhů nástrojových ocelí, určených pro výrobu velkých výkovků o hmotnosti 8 tun velmi namáhaných nástrojů pro práci za tepla. Příkladem těchto jakostí je Cr-Mo-V-Si ocel dle ČSN419552 nebo ocel dle ČSN419554, případně jejich ekvivalenty dle zahraniční normy DIN17350 jakost oceli X38CrMoV51 nebo X40CrMoV51. Práce řeší problematiku výroby ingotů z těchto ocelí, kde jejich kvalita je jednou ze základních podmínek zvládnutí výroby bezvadných výkovků.

V rámci návrhu a realizace optimalizačních kroků v technologii výroby velkých výkovků z nástrojových ocelí byly stanoveny příčiny vzniku vnitřních vad ingotů a výkovků jakosti dle ČSN 419554 a oceli 8CrMoSiV [1].

Práce byla řešena v rámci grantového projektu TANDEM FT-TA/061 a FR-TII/222.

2. VÝROBA VELKÝCH INGOTŮ Z NÁSTROJOVÝCH OCELÍ

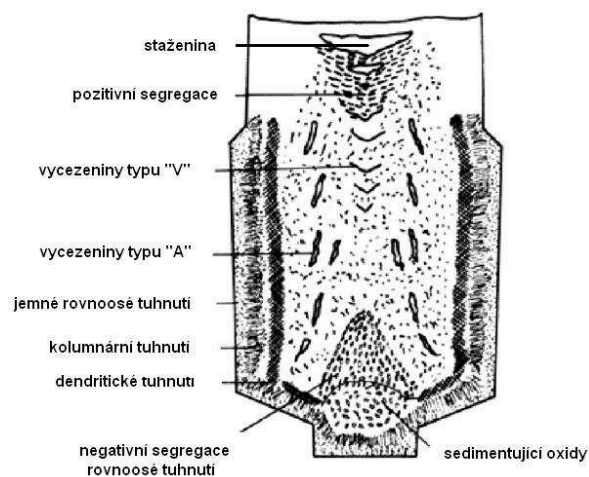
Tradiční produkce zařízení a nástrojů pro těžké strojírenství a metalurgii vyžaduje výrobu velkých výkovků z nástrojových ocelí. K tradičnímu sortimentu nástrojových ocelí lze řadit například jakosti dle ČSN 19 313, 19 429, 19 436, 19 511, 19 552, 19 554, 19 662, 19 663 nebo oceli dle zahraničních norem například 90MnCrV8, X37CrMoV51, X40CrMoV51, 55NiCrMoV7, X210Cr12 a speciální oceli na výrobu válců 8CrMoV, 8Cr3MoSiV, 8CrMoSiV.

Problematika výroby výkovků z nástrojových ocelí z hlediska tváření a rostoucí požadavky na vnitřní kvalitu výrobku vyžadují vstupní polotovar – ingot s vysokými parametry vnitřní jakosti. Tato problematika souvisí se sníženými plastickými vlastnostmi u ocelí s vysokým obsahem uhlíku v kombinaci s legujícími prvky, chromem, molybdenem a vanadem. Pro dostatečné prokování ingotu a odstranění vnitřních vad zejména v místech posledního tuhnutí, tedy v osově části ingotu, je nezbytné zajistit vysokou rychlost tváření a dostatečné objemy deformací. V případě výroby rozměrných výkovků, kdy nelze tvářením zajistit potřebnou deformaci v osově části ingotu, je nutné dosáhnout požadované vnitřní kvality, snížením podílu vnitřních vad v původním polotovaru samotném – v ingotu. [2]

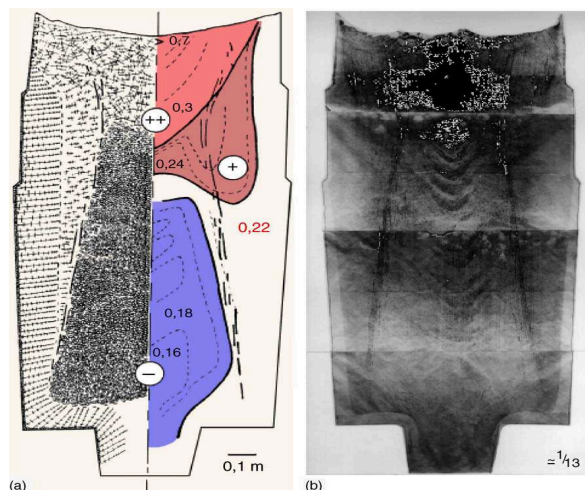
Kontrola vnitřní jakosti výkovků z hlediska výskytu vad typu trhlin a dutin je prováděna zkouškou ultrazvukem. Vzhledem k požadavkům na životnost nástrojů a jejich odolnost vůči značnému dynamickému namáhání je nezbytné dosahovat vysoké vnitřní homogenity bez výskytu kritických vad.

2.1 Vnitřní vady ingotů z nástrojových ocelí

Na obr. 1 je znázorněna vnitřní struktura ingotu v podélném řezu. [3] Vnitřní vady jako staženiny a poresita musí být při tváření uzavřeny a tím odstraněny, aby se předešlo v konečném důsledku selhání hotového výkovku, hotové součásti (např. hřídele), v průběhu její životnosti. [4]



Obr. 1: Vnitřní struktura ingotu



Obr. 2: a/ makrostruktura a makrosegregace uhlíku, b/ Baumannův otisk – makrosegregace síry

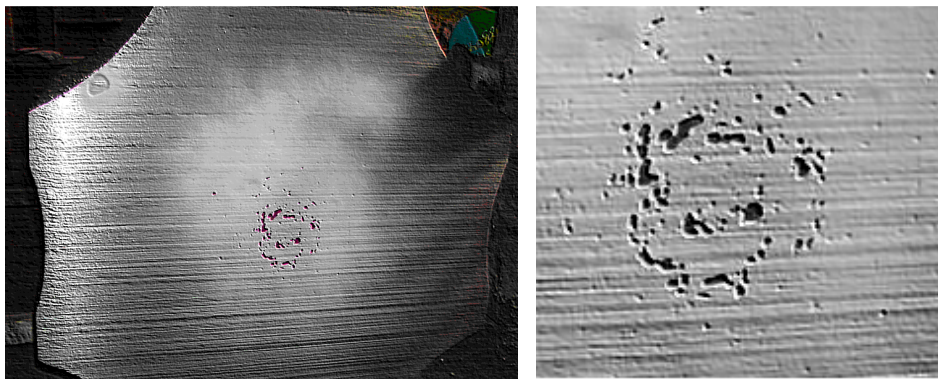
Pro zajištění zdravé vnitřní struktury je nutný proces tváření ingotu za tepla - kování, při kterém dochází k odstranění běžně se vyskytujících vnitřních vad typu ředin a drobných dutin. Tím více je důležité zaměřit se na problematiku odstraňování těchto vnitřních vad a to především v případě velkých ingotů a hůře tvařitelných jakostí materiálů.

Na obr. 2a je pak jednak znázorněna makrostruktura velkého ingotu společně se zakreslením chemické heterogenity – makrosegregace uhlíku a na obr. 2b je tzv. Baumannův otisk resp. makrosegregace síry [3].

Analýza ingotů a výkovků z nástrojových ocelí je prováděna v souvislosti s rozsáhlým a opakovaným výskytem osových vad výkovků. Přináší zajímavé poznatky z oblasti tuhnutí, krystalizace a tváření ingotů. V tomto případě je práce zaměřená na ingot formátu 8K8,4 o hmotnosti 7 600kg, jehož rozměry jsou uvedeny na straně 15 v tabulce č.2.

I přes uplatnění mezních možností deformace materiálu na kovacím lisu, potvrzují metalografické rozbory výkovků domněnku nedostatečného prokování osy ingotu. Analýzy litého ingotu pak poukazují na příčiny výskytu vad v ose výkovku.

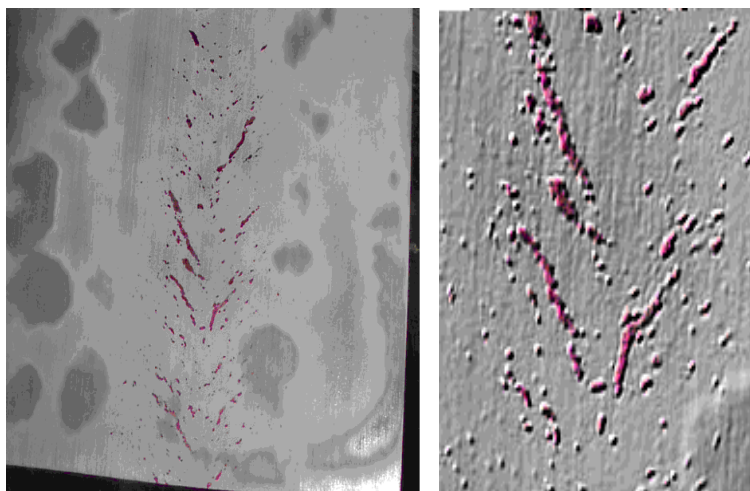
Na obr.3 je uveden snímek ingotu 8K8,4 oceli jakosti dle ČSN 419429 v příčném řezu v 1/2 výšky těla ingotu po provedení kapilární zkoušky – penetrační metodou. Tato metoda spočívá v očištění a odmaštění zkoušeného povrchu, jeho vysušení, nanesení penetrační látky, která má vysokou vztlínavost, setření této látky ze zkoumaného povrchu a nanesení reflexní vrstvy. Reflexní vrstva zviditelní všechny i sebemenší dutiny, ve kterých zůstala penetrace.



Obr. 3: Pohled na příčný řez ingotu v polovině výšky jeho těla po kapilární zkoušce a detail osově části ingotu

Ze snímků na obr. 3 je zřejmý výrazný výskyt pravidelných dutin a ředin v ose ingotu v $\frac{1}{2}$ jeho výšky, které v některých případech dosahují velikosti až 10mm. Konkrétní shluk osových vad má průměr přibližně 150mm, přičemž střední průměr ingotu v tomto místě je 840mm.

Obdobnou informaci poskytuje obr.4, který zobrazuje část podélného řezu ingotu, na kterém byla rovněž provedena stejná kapilární zkouška. Tato zkouška zviditelnila rozložení a průběh osových vad po výšce ingotu. V tomto konkrétním případě se jedná o horní část ingotu pod hlavou. V ose ingotu se nachází souvislé trhliny a dutiny o šířce větší než 5 mm v některých případech v délce až několika centimetrů.



Obr. 4: Pohled na podélný řez podhlavové části ingotu po kapilární zkoušce a detail osově části ingotu

Staženina a řediny v ingotu zaujmají u uhlíkové oceli podle Nechendziho průměrně 3,0 až 3,5%, tedy méně než je skutečné smrštění oceli. Část zmenšení objemu oceli smrštěním

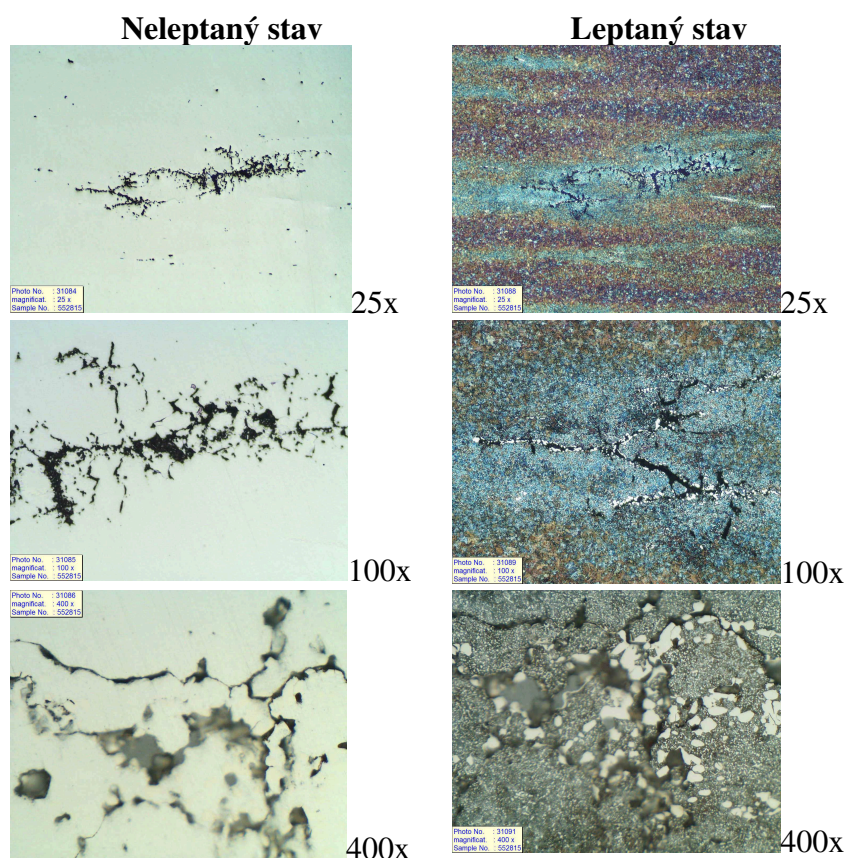
připadá na celkové smrštění ingotu a část také na vznikající mezidendritické mikrodutiny. Kolem staženiny a především v jejím pokračování v ose ingotu při neovlivněném tuhnutí ingotu vznikají řediny a pórovitost [11].

Tyto osově vady se ve větší či menší míře vyskytují po celé výšce ingotu. Velikost a jejich tvar závisí na mnoha vlivech. Lze je rozdělit na vlivy dané pecní technologií – desoxidace oceli, teplota oceli, a na vlivy dané technologií odlévání – geometrické rozměry a tvar ingotu, rychlost odlévání, způsob odlévání, způsob ošetření hlavy ingotu apod. jakož i na vlivy dané chemickým složením oceli. [6]

Výskyt osových vad u ingotů je obecně známý jev, který je experimentálně jednoznačně potvrzen, a který je nutné mít na zřeteli při jejich zpracování resp. při výrobě výkovků. Dizertační práce se ale zaměří i na možnosti, jak tento jev částečně eliminovat. [7]

2.2 Kvalifikace osových vad výkovků z nástrojových ocelí

Příklad osové vady ve výkovku válce o průměru 280mm z nástrojové oceli dle ČSN419511 je uveden na obr. 5



Obr. 5: Příklad osové vady výkovku válce o průměru 280mm

Z metalografického hlediska jsou nejčastěji identifikovány následující vnitřní vady:

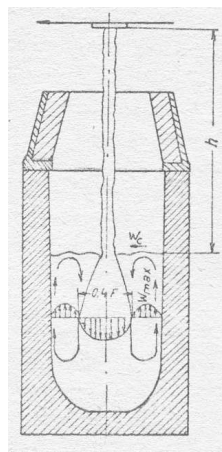
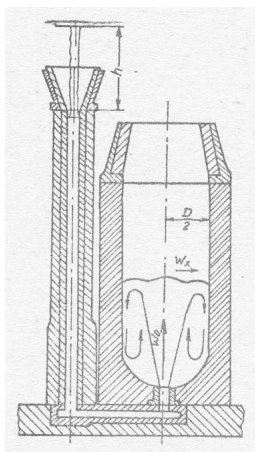
- trhliny v oblastech vycezenin (velikost 2-3mm) + dutiny
- vady ve „vláknech“ – primární karbidy tvoří řádky a shluky
- husté nahromadění karbidů – tvoří síťoví po hranicích zrn

2.3 Možnosti eliminace osových vad (trhlin, dutin, necelistvostí) ingotů

V procesu výroby ingotů se na jejich vnitřní jakosti významně podílí zejména:

2.3.1 Technologie odlévání ingotů

Při odlévání spodem obr.6 přichází nejteplejší ocel do dolní části ingotu, cestou do horních částí se ochlazuje, takže se do hlavy dostává během lití ocel relativně chladnější a vznikají tak podmínky pro tvorbu staženiny zkrácením doby, po kterou zůstává ocel v hlavě ingotu tekutá. Výzkum a porovnání ingotů litých spodem a horem obr. 7 však neukázal vliv způsobu lití na tvorbu staženin příp. středových ředin. Během krátké doby dochází v průběhu lití působením samovolné gravitační konvekce k vyrovnání teplot v tekuté části ingotu. V ingotu pak nejsou větší rozdíly v teplotě, které by mohly ovlivnit postup tuhnutí [12].



Obr. 6: Odlévání ingotu spodem

Obr. 7: Odlévání ingotu horem

V podmínkách většiny oceláren se tedy provádí pouze odlévání ingotů spodem. Ve výjimečných případech, jako je např. při tzv. zamrznutí ingotu v licím kanálku při jeho

odlévání, lze provézt odlití ingotu horem. Technologie lití ingotů spodem, ve srovnání s technologií lití ingotů horem, má však nesporné výhody:

- Klidnější stoupání oceli v kokile snižuje nebezpečí vzniku šupin.
- Dobrá regulace rychlosti lití a tím možnost dosáhnout lepší kvality povrchu ingotu.

Povrchová kvalita ingotů je tedy nesrovnatelně lepší než v případě použití technologie lití ingotů horem. Ingoty odlévané horem obvykle nevyhovují požadavkům na vnitřní čistotu a významně se zvyšuje podíl povrchových vad ingotů. Naopak lze předpokládat výhodnější podmínky tuhnutí ingotu, protože hlavová část ingotu je plněna poslední [5], [8], [9].

2.3.2 Typ a vlastnosti odlévané oceli

Sortiment nástrojových ocelí pro výrobu ingotů většinou zahrnuje nelegované, nízko a středně legované nástrojové a rychlořezné oceli. Specifické chemické složení ocelí vyžaduje proto zvláštní pozornost při volbě licí teploty a licí rychlosti, tedy jedinečný přístup ke každé značce oceli, resp. skupinám ocelí.

2.3.2.1 *Náchylnost ocelí ke vzniku prasklin a trhlin*

Náchylnost ingotů ke vzniku prasklin a trhlin je dána chemickým složením oceli. Přesně nelze oceli rozdělit, neboť vznik prasklin je podporován dále rychlostí odlévání, rychlostí chladnutí, způsobem chlazení ingotu, jeho tvarem, velikostí a dalšími podmínkami.

Obecně lze říci, že zvýšenou pozornost je nutno věnovat ingotům z ocelí s vyšší pevností a tvrdostí, ke kterým se řadí většina nástrojových ocelí.

U nástrojových ocelí nelegovaných s obsahem uhlíku nad 0,40 hm.% můžeme zvýšenou citlivost na vznik prasklin vysvětlit zvýšením křehkosti. Křehkost těchto ocelí za vysokých teplot, je způsobena nejen chemickým složením, ale i velikostí zrna. U hrubozrnného materiálu je nebezpečí vzniku povrchových trhlin při tuhnutí ingotu, nebo následném zpracování za tepla, podstatně větší než u oceli s jemnozrnnou primární strukturou. Vlivem značného poklesu mezikrystalické pevnosti za vysokých teplot dochází ke vzniku mezikrystalických lomů, které jsou často příčinou znehodnocení celého ingotu, resp. výkovku.

Vznik hrubozrnné struktury při tuhnutí ingotu odlitého z oceli vyrobené technologií mimopecního zpracování s vakuovou desoxidací, může být způsoben především její vysokou čistotou čímž dojde k negativnímu ovlivnění (omezení) průběhu heterogenní nukleace (krystalizace).

Ocel zpracovaná technologií VD tedy může vykazovat hrubou lící strukturu, větší sklon k odmíšení a následkem pnutí sklon ke vzniku trhlin.

Homogenní nukleace předpokládá vznik nové fáze bez pomoci cizích zárodků a přímo závisí pouze na stupni přechlazení taveniny. Provozně dosažitelný stupeň přechlazení taveniny je omezen slévateľností oceli za nižších teplot a rizikem „zamrznutí“ oceli při plnění kokily, případně vzniku zavalenin na povrchu těla ingotu. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se rovněž rozšiřuje pásmo tuhnutí, což v praxi znamená zhoršené podmínky pro vznik tuhé fáze v tavenině dle principu homogenní nukleace.

Z vlivů působících na průběh krystalizace oceli nelze vyloučit ani působení heterogenních částic konstituovaných na bázi legujících nebo doprovodných prvků v oceli. Mezi prvky s podstatným vlivem na výslednou strukturu oceli lze zařadit Al, Ti, Ca, Zr, V, Nb apod. Všechny tyto prvky mají větší afinitu ke kyslíku nebo dusíku, než je afinita železa a ostatních běžných prvků. V oceli modifikované uvedenými prvky tak mohou vznikat požadované zárodky pro heterogenní nukleaci, a to ve formě nitridů MeN , Me_2N , nebo oxidů MeO , MeO_2 , Me_2O_3 , Me_2O_5 . Vzniklé heterogenní fáze (oxidy a nitridy) představují z metalografického pohledu určitý stupeň znečištění oceli.

2.3.2.2 Teplota lití oceli

Teplota lití oceli patří k hlavním faktorům ovlivňujícím výslednou jakost povrchu i vnitřní strukturu ingotu. Určení teploty lití obecně vychází z teploty likvidu oceli a nezbytné teploty přehřátí pro odlití zdravého odlitku – ingotu [9].

Existuje několik způsobů výpočtu resp. typů rovnic pro výpočet teploty likvidu prezentovaných jejich autory v odborné literatuře. V tab.1 je uvedeno několik příkladů rovnic pro výpočet teploty likvidu. [9], [10], [11], [12]

Tab. 1: Příklad rovnic pro výpočet teploty likvidu

Autor	Rovnice	Zdroj
T. Myslivec	$T_L = 1535 - 73 \cdot C - 3 \cdot Mn - 12 \cdot Si - 28 \cdot P - 30 \cdot S - 7 \cdot Cu - 1 \cdot Cr - 3,5 \cdot Ni - 3 \cdot Al - 1 \cdot Sn - 2 \cdot Mo - 18 \cdot Ti - 2 \cdot V - 1,8 \cdot Co$	[10]
L. Šmrha	$T_L = 1534 - [80 \cdot C + 14 \cdot Si + 4 \cdot Mn + 35 \cdot P + 35 \cdot S + 2,6 \cdot Ni + 1,4 \cdot Cr + 1,2 \cdot Mo + 3,4 \cdot Al]$	[9]
CLECIM (TŽ Třinec a.s.)	$T_L = 1537,4 - 100,3 \cdot C + 22,1 \cdot C^2 - 13,55 \cdot Si + 0,64 \cdot Si^2 - 5,82 \cdot Mn - 0,30 \cdot Mn^2 - 4,18 \cdot Ni - 0,01 \cdot Ni^2 - 4,20 \cdot Cu - 1,59 \cdot Cr + 0,007 \cdot Cr^2 - 3 \cdot Mo$	[-]
TECTIP (Mannesmann)	$T_L = 1535,6 - 88 \cdot C - 8 \cdot Si - 5 \cdot Mn - 5 \cdot Cu - 1,5 \cdot Cr - 4 \cdot Ni - 2 \cdot Mo - 18 \cdot Ti$	[-]
Roeser-Wensel (Mannesmann)	$T_L = 1539 - K \cdot C - 8 \cdot Si - 5 \cdot Mn - 30 \cdot P - 25 \cdot S - 5 \cdot Cu - 1,5 \cdot Cr - 4 \cdot Ni - 2 \cdot Mo - 2 \cdot V - 1 \cdot W - 14 \cdot As - 10 \cdot Sn - 1300 \cdot H - 90 \cdot N - 80 \cdot O$ kde $K=65$ ($C \leq 1\%$), $K=70$ ($C > 1\%$), $K=75$ ($C > 2\%$), $K=80$ ($C > 2,5\%$)	[-]
Dubovick	$T_L = 1535 - 66,7 \cdot C - 7,8 \cdot Si - 5 \cdot Mn - 30 \cdot P - 25 \cdot S - 5 \cdot Cu - 1,5 \cdot Cr - 4 \cdot Ni - 2 \cdot V$	[11]
Aymard	$T_L = 1535 - 80 \cdot C - 14 \cdot Si - 4 \cdot Mn - 35 \cdot P - 35 \cdot S - 1,4 \cdot Cr - 2,6 \cdot Ni - 3,4 \cdot Al$	[12]

Teplota likvidu je nejčastěji stanovována na základě středního obsahu prvků dle předpisu chemického složení pro danou jakost. Ideální je však teplotu likvidu stanovit na základě skutečného chemického složení oceli těsně před vlastním odléváním.

Teplota přehřátí oceli je pak stanovena empiricky s ohledem na zvolenou výrobní technologii, podmínky odlévání daného provozu a velikost a tvar ingotu. Současná technologie výroby oceli uvádí nejčastěji obecný předpis pro stanovení licí teploty pro odlévání ingotů řady 8K s ohledem na předchozí zpracování dle následujících vztahů:

- EOP technologie: $T_{lití} = T_{likvidu} + 80^\circ C$
- LF technologie: $T_{lití} = T_{likvidu} + 70^\circ C$
- VD/VOD technologie: $T_{lití} = T_{likvidu} + 60^\circ C$

Některé speciální skupiny ocelí však vyžadují odlišný stupeň přehřátí, než uvádí obecný technologický předpis. Jsou to především:

- Oceli s obsahem uhlíku nad 0,40 hm. %C minimální přehřátí => + 40 °C.
- Ložiskové a nástrojové oceli minimální přehřátí => + 50 °C.
- Oceli s přísadou Al, Ti, V vyšší přehřátí => + 70 °C.
- Austenitické oceli stabilizované Ti vyšší přehřátí => + 80 °C.

Příklady teplot přehřátí oceli v pánvi jsou uvedeny pro odlévání ocelí, zpracovávaných technologií VD/VOD, v případě kterých je doba setrvání kovu v pánvi delší. Vlivem většího naakumulovaného tepla ve vyzdívce pánve pak nedochází v průběhu odlévání k tak výraznému poklesu teploty kovu.

2.3.2.3 Rychlost lití oceli

Rychlost lití oceli je další z rozhodujících faktorů, ovlivňujících výslednou jakost zejména povrchu ingotu, ale i vnitřní kvalitu [13], [14]. Volbu licí rychlosti ovlivňuje:

- Jakost odlévané oceli – chemické složení, desoxidace
- Typ kokily resp. ingotu – velikost a jeho tvar

Oceli se sklonem k vyšší viskozitě, oceli s vyšším obsahem hliníku, oceli se zvýšeným obsahem Cr, V, W, nebo oceli s přísadou Ti, vyžadují zvýšenou rychlost odlévání. Oceli tekutější, např. s vyšším obsahem prvků C, Mn, Ni, Si je nutné odlévat menšími rychlostmi.

S ohledem na existenci nástrojových ocelí legovaných MnCr, MnV, CrNi, CrSi, CrSiW, apod., se volba optimální licí rychlosti stává poměrně složitou.

Pracovní postupy a technologické předpisy výroby ingotů rozlišují nejčastěji tři základní způsoby odlévání oceli.

- pomalé 0,4 až 0,7 t . min⁻¹
- normální 0,8 až 1,2 t . min⁻¹
- rychlé 1,3 až 2,0 t . min⁻¹

2.3.2.4 Velikost a tvar ingotu

Zaměření této práce je situováno do oblasti kovářských ingotů z nástrojových ocelí. Obecně se v podmínkách některých oceláren a kováren prokazuje úzká vazba mezi velikostí ingotu a počtem nevyhovujících zkoušek ultrazvukem, především pak v osově části výkovku [15]. Ve všech detailně zkoumaných případech byla konstatována osová necelistvost materiálu volně kovaného výkovku, potvrzená zkouškami ultrazvukem.

Na základě podrobné analýzy bylo možné konstatovat, že se jedná o trhliny v oblastech vycezenin, vznikajících na hranicích útvarů primárních a eutektických karbidů, které jsou v osách dendritického odmíšení. Primární příčinou jejich vzniku je silné odmíšení.

Z hlediska geometrie kovářského ingotu typu 8K8,4 bylo provedeno porovnání s ingoty vybraných „konkurenčních“ výrobců nástrojových ocelí. Tab.2 uvádí základní rozměry a rozměrové charakteristiky vybraných ingotů.

Tab. 2: Ingot 8K8,4 a geometrie ingotů vybraných výrobců nástrojových ocelí (NO)

Výrobce ingotů - typ ingotu		Hmotnost		Rozměry ingotu [mm]									S	u	k	1/2 V	
		ingot	patní průměr			horní průměr			D _g střed těla	výška			H ₁ / D _e	úkos (D _{H0} -D _{p0}) / (2· H ₀)	konicita (D _{2p} -D _{2h}) / H ₁	konicita arctg (D _{H0} - D _{P0}) / 2) / H ₁	
			D _{p1} patní	D _{p2} patní	D _{p3} patní	D _{H1} horní	D _{H2} horní	D _{H3} horní		H ₁ tělo	H ₂ hlava	H ingot					
ŽDAS, a.s.		8K 8.4	7 600	842	709	776	974	820	897	836	1660	350	2010	1.99	3.7%	-7.3%	1.9
Dorrenberg Edelstahl Kovářský osmihranný ingot		7,5t	7 500	850	750	800	1020	930	975	888	1530	350	1880	1.72	5.7%	-11.4%	3.4
		9,0t	9 000	830	747	788.5	1030	959	994.5	892	1800	350	2150	2.02	5.7%	-11.4%	3.4
		10,0t	9 800	860	755	807.5	1078	955	1017	912	2000	300	2300	2.19	5.2%	-10.5%	2.9
Breitenfeld Edelstahl Kovářský osmihranný ingot a polygonální ingot P3850		A900	9 500	810	740	775	1020	930	975	875	1800	320	2120	2.06	5.6%	-11.1%	3.0
		A1300	12 430	950	870	910	1185	1085	1135	1023	1700	210	1910	1.66	6.6%	-13.2%	3.6
		A1450	14 300	950	870	910	1210	1110	1160	1035	1900	320	2220	1.84	6.6%	-13.2%	3.6
		A1850	18 400	1190	1080	1135	1395	1285	1340	1238	1800	250	2050	1.45	5.7%	-11.4%	3.3
		A2150	21 850	1190	1080	1135	1425	1315	1370	1253	2050	250	2300	1.64	5.7%	-11.5%	3.3
POLDI Hütte s.r.o. Kladno		P3850	38 500	1470	1400	1435	1850	1740	1795	1615	2200	500	2700	1.36	8.2%	-16.4%	4.4
		K11	1 232	320	320	320	416	416	416	368	1430	170	1600	3.89	3.4%	-6.7%	1.9
		K21	2 000	415	415	415	500	500	500	458	1380	210	1590	3.02	3.1%	-6.2%	1.8
		K45	4 900	530	530	530	680	680	680	605	1850	490	2340	3.06	4.1%	-8.1%	2.3
		K60	6 800	630	630	630	780	780	780	705	1900	640	2540	2.70	3.9%	-7.9%	2.3
		K120	12 500	860	860	860	960	960	960	910	2100	600	2700	2.31	2.4%	-4.8%	1.4
		K180	18 300	1050	1050	1050	1150	1150	1150	1100	1950	630	2580	1.77	2.6%	-5.1%	1.5
ŠKODA STEEL Plzeň		K200	22 000	1150	1150	1150	1260	1260	1260	1205	2100	680	2780	1.74	2.6%	-5.2%	1.5
		J8IH	7 330	628	628	628	786	786	786	707	1807			2.56	4.4%	-8.7%	2.5
		J10IH	9 610	687	687	687	864	864	864	776	2013			2.60	4.4%	-8.8%	2.5
Vřtkovice Heavy Machinery a.s. Ostrava		J13IH	12 640	841	841	841	988	988	988	915	1861			2.03	3.9%	-7.9%	2.3
		V8EX	7 280	738	738	738	779	779	779	759	1672		1672	2.20	1.2%	-2.5%	0.7
		8K10EX	9 220	790	790	790	910	910	910	850	1780		1780	2.09	3.4%	-6.7%	1.9
METALURG Dubnica nad Váhom		8K13EX	11 700	842	842	842	979	979	979	911	1820		1820	2.00	3.8%	-7.5%	2.2
		J8H	7 380	640	640	640	800	800	800	720	1810	450	2260	2.51	4.4%	-8.8%	2.5
		J8P	8 250	640	640	640	800	800	800	720	1960	790	2750	2.72	4.1%	-8.2%	2.3
		J10	10 200	700	700	700	880	880	880	790	2010	900	2910	2.54	4.5%	-9.0%	2.6

Tab.2 porovnává ingot 8K8,4 s podobnými ingoty jiných výrobců nástrojových ocelí. Vezmeme-li v úvahu pouze ingoty o hmotnosti od 7 do 10 tun pak dojdeme k následujícím závěrům:

- štíhlost resp. poměr H/D se pohybuje od 1.7 do 3.9 (ingot 8K8,4 - 1.99)
- úkos v rozmezí 1.2% až 8.2% (ingot 8K8,4 – 3.7%)
- a konicita 1/2V od 0.7° do 4.7° (ingot 8K8,4 – 2.1°)

Z uvedeného, poměrně širokého rozpětí jednotlivých geometrických parametrů vyplývá, že je nutné ověřit a stanovit, která z těchto variant bude optimální pro výrobu jakostních ingotů z nástrojové oceli. [16]

3. SIMULACE PODMÍNEK ODLÉVÁNÍ A TUHNUTÍ

Obecně výroba odlitků ve formách (pískových i kovových) je velmi složitý proces transportu tepla a hmoty při nestacionárních podmínkách a současném průběhu fyzikálně – chemických dějů. Z časového hlediska lze celý proces sdílení tepla mezi odlitkem a formou rozdělit na **tuhnutí** a **chladnutí** odlitku (ingotu).

V minulosti, kdy nebyla dostupná potřebná technika, se tuhnutí a krystalizace kovů i jejich slitin sledovalo nejčastěji na základě metalografického posouzení makrostruktury nebo mikrostruktury. Teprve v nedávné minulosti, kdy byl zaznamenán rozvoj experimentálních metod a výpočetní techniky, je možno sledovat tuhnutí odlitku nejen v celém komplexu, ale také v krátkých časových okamžicích. [17]

3.1 Přehled simulačních programů

K těmto účelům byla v posledním desetiletí na světě vyvinuta celá řada software (programových souborů), které jsou známé pod uživatelským označením uvedeném v tabulce 3. V našich podmínkách (ČR) našly uplatnění oba německé programy **SIMTEC** a **MAGMASoft®** a také software od švédské firmy NOVACAST (**NOVA FLOW** a **NOVA SOLID**). Z hlediska dokonalosti se k těmto programům řadí i americký **PROCAST™**, který není v Evropě tolik rozšířený.

Tab. 3: Přehled simulačních programů

Název programu	Země původu	Metoda tvorby sítě	Možnosti simulačních výpočtů				Poznámka
			Plnění	Tuhnutí	Zbytkov á pnutí	Struktura	
PROCAST™	USA	FEM	X	X	X	X	3D
SIMTEC	SRN	FEM	X	X	X	X	3D
MAGMASOFT	SRN	FDM/ FEM	X	X	X	X	
NOWA FLOW NAVA SOLID	ŠVÉDSKO	FDM	X	X	-	X	
PAMCAST™ SIMULOR	FRANCIE	FEM/ FDM	X	X	-	-	3D
THEL	SRN	FDM	-	X	X	-	
SOLSTAR	ANGLIE	MM	-	X	-	-	
CAP	USA	FEM	X	X	X	X	3D

Tyto simulační programy (software) jsou komplexní programy, pomocí kterých (závisí na jednotlivých programech) lze stanovit simulačním výpočtem následující:

- *tuhnutí a chlazení odlitku*
- *výpočty možnosti plnění formy*
- *zbytková pnutí*
- *strukturu*

Pro tyto účely programy obsahují matematické rozpracování nejrozličnějších rovnic a fyzikálních zákonů:

- *Navier – Stokesův zákon o zachování hybnosti – viz. obr.8*
- *Fourierovu diferenciální rovnici nestacionárního vedení tepla – viz. obr.9*
- *zákony mechaniky tuhého tělesa při plastické a elastické deformaci*
- *rovnice pro stanovení napětí a deformace*
- *transformační a strukturní diagramy*

$$\rho \cdot \underline{v}' + \underline{v} \cdot \text{div}(\rho \cdot \underline{v}) = \rho \cdot \underline{g} + \text{grad}(p) + \nu \Delta \underline{v},$$

kde značí: ρ - hustotu proudícího média

\underline{v} - rychlost

p - tlak

ν - součinitel kinetické viskozity

Obr. 8: Navier – Stokesova rovnice – uplatňující se pro plnění formy taveninou

$$\frac{\partial T}{\partial t} = v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \nabla^2 T,$$

kde značí: T - teplotu;

a - teplotní vodivost taveniny;

v_x, v_y, v_z - rychlost pohybu elementu taveniny v příslušném směru souřadného systému;

∇^2 - Laplasův operátor;

t - čas.

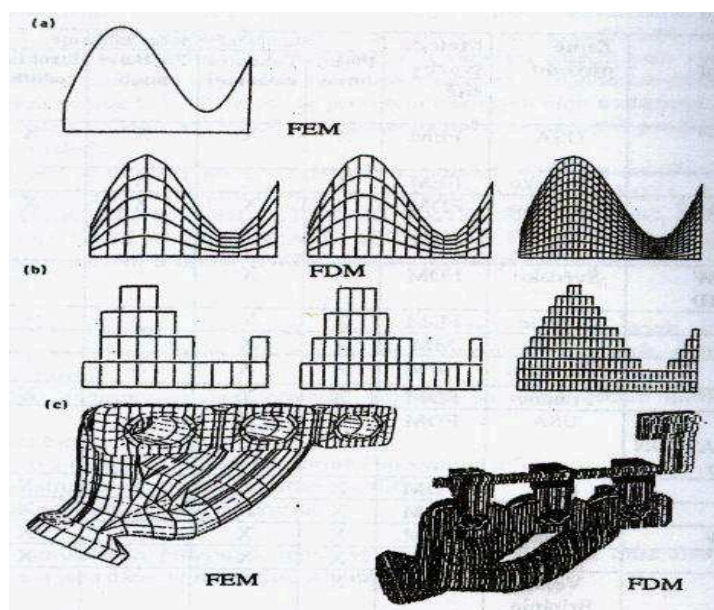
Obr. 9: Fourierova – Kirchhoffova diferenciální rovnice vedení tepla

3.2 Způsoby řešení zadaných tepelných úloh

Řešení tepelných úloh se stanovením rozložení teploty (teplotních polí) lze provést **analyticky, numericky nebo experimentálně**. Analytické řešení umožňuje získání tepelné úlohy ve tvaru matematického výrazu nebo funkční závislosti teploty na souřadnicích a čase.

Numerické metody mají především uplatnění při počítačových simulacích. Jejich podstata závisí na diskreditaci proměnných. Je to proto, že je pro ně typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu, což odpovídá operačním vlastnostem číslicových počítačů.

Numerické metody umožňují získat řešení tepelné úlohy v konečném počtu diskrétních míst (uzlů) zvolené výpočtové sítě. Mezi numerické metody se řadí **metoda konečných prvků (FEM)** a **metoda konečných diferencí (FDM)** – obr. 10.



Obr. 10: Schéma dělení plochy při uplatnění různých numerických metod

Metoda konečných prvků (FEM) – je založená na rozdělení dané oblasti na konečný počet jednoduchých prvků „konečných prvků“, o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranicích prvků.

Metoda konečných diferencí (FDM) – někdy též jako metoda sítí, je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající diferenciální rovnice, jež má tvar algebraických rovnic.

I když obě metody (FEM i FDM) jsou založeny na jistém zjednodušení reality, **má FEM ve srovnání s FDM určité výhody:**

- dovoluje lepší geometrický popis a vystižení okrajových podmínek při složitých tvarech integrační oblasti
- umožňuje využití místně zjemněné diskretizace ve významných částech řešené oblasti bez zvláštních úprav výpočtového programu
- umožňuje jednodušší použití vyšších typů aproximace hledané funkce s cílem zvýšení přesnosti řešení

3.3 Numerická podstata programu MAGMAsoft®

Používání metody pro výpočet napětí FEM vedlo k tomu, že síť podle této metody se poměrně obtížně vytvářela, v problematice se orientovali pouze specialisté a kvalita použité sítě velmi citelně ovlivňovala přesnost výsledku. Pro překonání těchto obtíží byl vyvinut nový software pro výpočet napětí, který je založen na řízených objemech podle metody FDM. Tvorba sítě podle této metody je snadná a výsledky odpovídají realitě. [18]

Výchozím bodem metody FDM je časově závislé rozdělení teploty v odlitku, jenž je popsáno diferenciálními rovnicemi. Ty však mohou být analyticky řešené jen pro kouli nebo nekonečnou plochu. Všechny ostatní tělesa lze řešit jenom na základě podobností. Pomocí této diferenční metody se úloha převede dle diferenciálního operátoru (nejčastěji pomocí Taylorova rozvoje) na diferenciální rovnice, podle nichž se různá tělesa mohou řešit za určitých omezení – okrajové podmínky pro řešení diferenciálních rovnic. Tohoto postupu je využito v simulačním programu MAGMAsoft®. [18]

Princip spočívá v tom, že diferenciální rovnice je jednoduše změněna v rovnici diferenční a k vyřešení diferenční rovnice je geometrie rozdělena na ortogonální (strukturovanou) síť.

Program MAGMAsoft®, jehož vývoj a distribuci zabezpečuje německá firma MAGMA GmbH, je celosvětově nejrozšířenějším systémem. V současné době existuje ve světě zhruba 750 průmyslových instalací, z toho 12 v ČR.

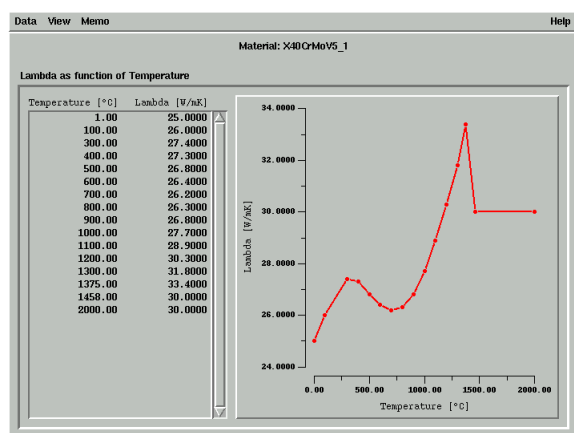
Program MAGMAsoft® pracuje na základě metody Konečných diferencí, což znamená, že výpočetní síť je tvořena „kostičkami“. Tento proces generování sítě je prováděn plně automaticky a doba trvání síťování se pohybuje okolo 1 minuty. Do tohoto automatického procesu může uživatel vstoupit pro určení velikosti jednotlivých elementů a jejich vzájemného poměru. Předností FDM metody je její rychlost, automatizace a přesnost bez nutnosti podrobných znalostí o generování sítí. [18]

Software MAGMAsoft® slouží k simulaci plnění a tuhnutí odlitků. Je schopen zobrazit dynamiku tečení kovu, tepelný tok, napětí a deformaci materiálu, změny struktury kovů při jejich tuhnutí a určit exaktně defektní místa. Jedná se o úplný výkonný nástroj, jehož použitím lze dosáhnout snížení neshodných výrobků, zvýšení využití tekutého kovu a snížení celkových nákladů při výrobě odlitku. [18] Program se vyznačuje uživatelsky příjemným prostředím, krátkým časem výpočtu, vysokou přesností, efektivitou a jednoduchostí obsluhy.

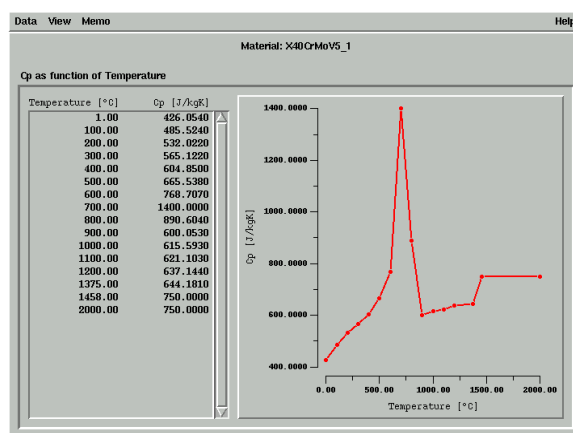
3.4 Základní parametry pro numerickou simulaci lití a tuhnutí

Neoddělitelnou součástí všech simulačních programů je kvalita fyzikálního popisu jednotlivých simulačních kroků, jejich matematická interpretace, ale také databáze vlastností materiálů, jejich reprezentativnosti a přesnosti a především tepelně závislých vlastností. [19]

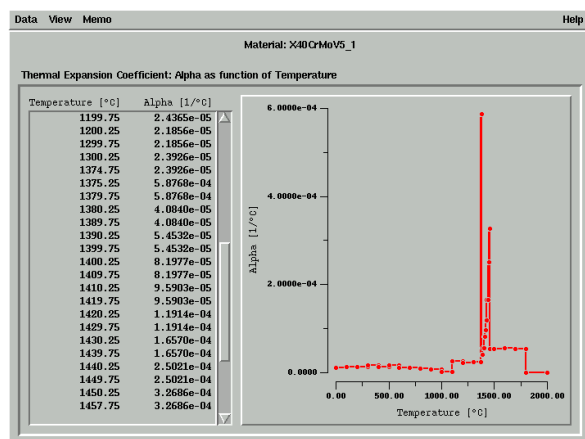
Pro výpočty je nutné v databázi MAGMASoft® zadat základní materiálové parametry oceli pro výpočty a numerickou simulaci lití a tuhnutí. Základní parametry jako jsou *chemické složení oceli, teplota likvidu, teplota solidu, měrná tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, součinitel teplotní roztažnosti, podíl tuhé fáze v dvoufázovém pásmu, měrná hmotnost oceli, viskozita oceli, Yongův modul pružnosti, koeficient zpevnění, Poissonův koeficient, napětí na mezi kluzu*, jsou uvedeny na obrázku 11 až 20.



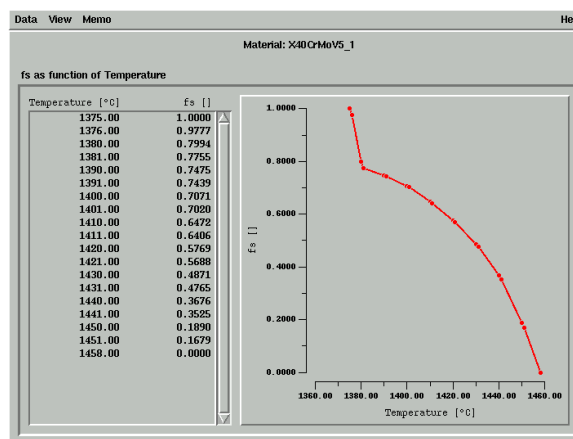
Obr. 11: Měrná tepelná vodivost λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) v závislosti na t ($^{\circ}C$)



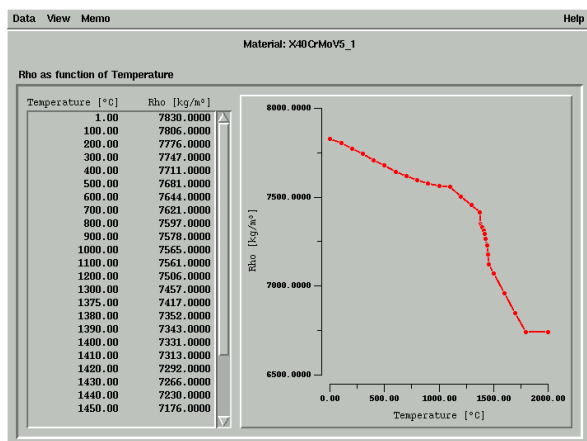
Obr. 12: Měrná tepelná kapacita C_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) v závislosti na t ($^{\circ}C$)



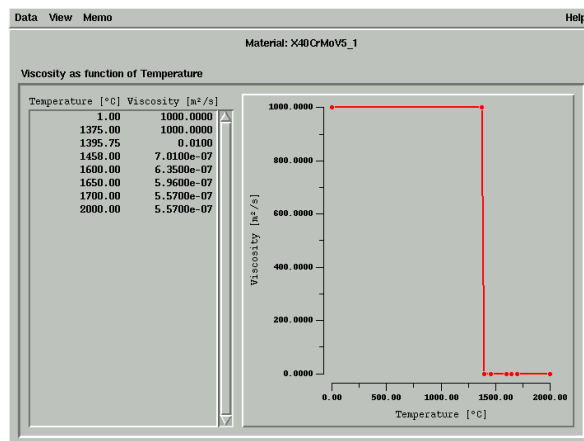
Obr. 13: Alfa – součinitel teplotní roztažnosti ($^{\circ}C^{-1}$) v závislosti na t ($^{\circ}C$)



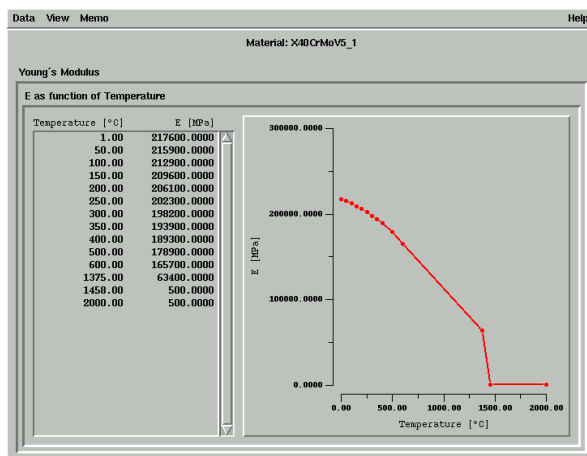
Obr. 14: f_s (1) – podíl tuhé fáze v pásmu $T_{likvidus} - T_{solidu}$ v závislosti na t ($^{\circ}C$)



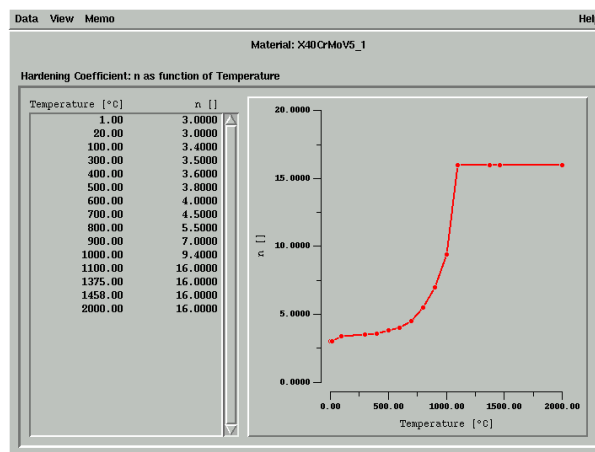
Obr. 15: Měrná hmotnost oceli „Rho“ ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) v závislosti na t ($^{\circ}\text{C}$)



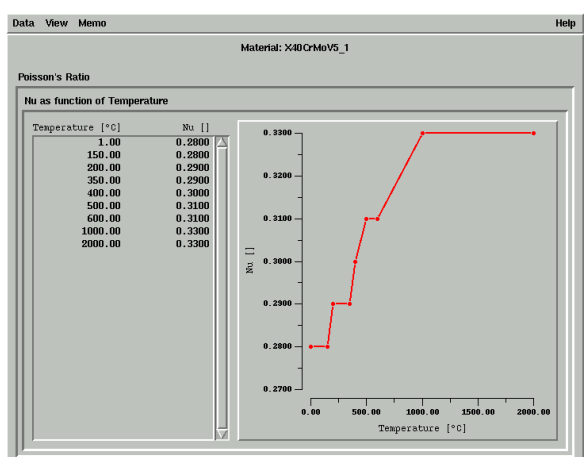
Obr. 16: Viskozita oceli ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) v závislosti na t ($^{\circ}\text{C}$)



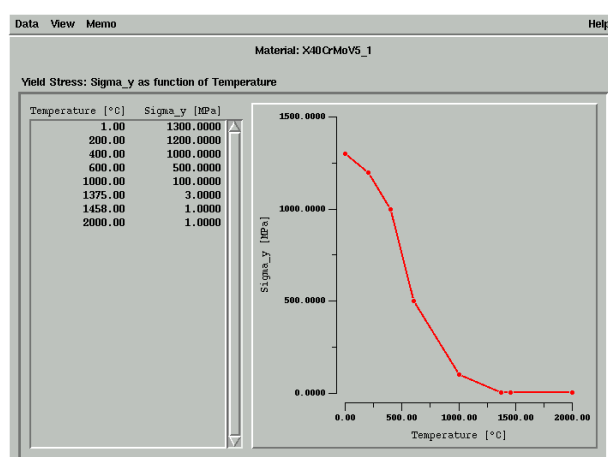
Obr. 17: Youngův modul pružnosti E (MPa) v závislosti na t ($^{\circ}\text{C}$)



Obr. 18: Koeficient zpevnění n (1) v závislosti na t ($^{\circ}\text{C}$)



Obr. 19: Poissonův koeficient „Nu“ ν (1) v závislosti na t ($^{\circ}\text{C}$)



Obr. 20: Napětí na mezi kluzu „Sigma y“ σ_y (1) v závislosti na t ($^{\circ}\text{C}$)

4. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Z provedeného literárního rozboru problematiky výroby hmotných ingotů a následných volně kovaných výkovků z hlediska vnitřní struktury a jakosti vyplývá, že je nutné zaměřit se na výzkum vlivu jednotlivých parametrů (teplota odlévání, rychlost odlévání, atd.) na výslednou jakost ingotu resp. výkovku. Z hlediska struktury a jakosti ingotu se jeví jako dominantní vliv tvaru kokily resp. ingotu.

Dizertační práce je zaměřena na využití a aplikaci výsledků modelování a simulace procesu odlévání a tuhnutí ingotů z nástrojových ocelí se zaměřením na vnitřní jakost a eliminaci makrosegregací.

Cílem práce je tedy:

1. Navržení optimálního tvaru kokily resp. ingotu o hmotnosti 8 až 10 tun, který bude výše uvedené vnitřní necelistvosti a makrosegregace eliminovat a následně zabezpečí dosažení vysoké jakosti odlévaných ingotů resp. hotových výkovků z nástrojových ocelí. Jedná se tedy především o:

- ⇒ změnu tvaru kokily
- ⇒ úpravu licích podmínek ingotu
- ⇒ úpravu patní části kokily
- ⇒ úpravu hlavové části kokily

2. Na základě dosažených výsledků navrhnout a odzkoušet optimální tvar nové kokily se zaměřením na výskyt vnitřních necelistvostí a homogenitu odlévaných ingotů.

3. Ověření dosažených výsledků v podmínkách nového tvaru kokily se zaměřením na výskyt vnitřních vad výkovků.

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – NUMERICKÉ SIMULACE

Pro numerické simulace odlévání oceli do forem (pískových i kovových) a jejich tuhnutí, byla vyvinuta celá řada programových prostředků, simulujících tento proces. Všechny jsou většinou určeny především k řešení problematiky odlévání a tuhnutí odlitků. Jedním z představitelů těchto programových prostředků je například MAGMASoft® [20], [21]. Tento software bylo možné zpočátku využít pro modelování odlévání a tuhnutí ingotů pouze v omezené míře. Postupem času byl však software výrobcí doplňován o další moduly a rozšíření, která dnes umožňují na velice dobré úrovni simulovat i proces odlévání a tuhnutí ingotů v kokilách. V rámci řešení této problematiky nebylo tedy nutné stanovovat žádné nové materiálové proměnné, definovat nové konstanty nebo fyzikální a chemické parametry uvažované ve výpočtovém modelu.

Pro simulaci lití a tuhnutí, z pohledu nástrojových ocelí problematických ingotů řady 8K, jsem v rámci této práce zvolil ingot o hmotnosti 7600kg (typ 8K8,4) a ocel GS80Cr ekvivalentní oceli 8CrMoSiV (značka POLDI) nebo oceli dle ČSN419511 [22]. V konečné fázi jsem rovněž ověřil materiál X40CrMoV51 dle DIN17350 (ekvivalentní oceli dle ČSN419554). [23], [24]

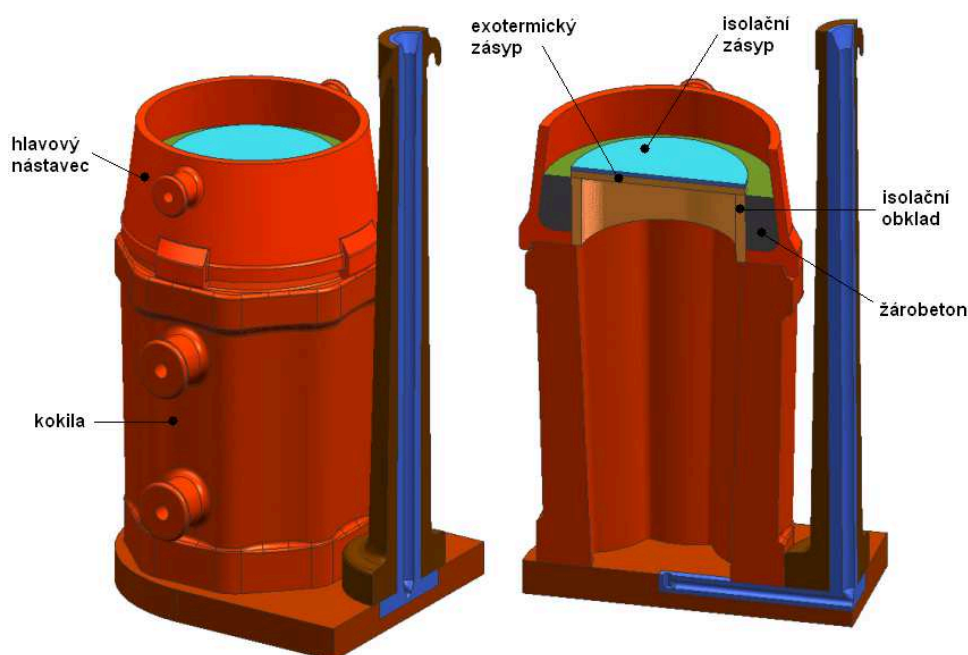
5.1 Procesní parametry simulace lití a tuhnutí oceli

Simulaci lití a tuhnutí jsem realizoval pro základní verzi kokily 8K8,4 jehož parametry jsou uvedeny v tab.4.

Tab. 4: Základní charakteristiky ingotu 8K8.4

Ingot	8K8,4
Hmotnost:	7 600 kg
Patní průměr	842 mm
Horní průměr	974 mm
Výška těla	1 660 mm
Poměr H/D	1,99
Úkos	2,1°
Počet stěn	8

Schematické znázornění navržené a zároveň zkoumané sestavy: kokila – hlavový nástavec – žárobeton – isolační obklad – exotermický zásyp – isolační zásyp, uvádí obr.21.



Obr. 21: Schéma kokily 8K8,4 a keramických materiálů pro simulaci lití a tuhnutí ingotu

5.1.1 Teplota lití oceli

Určení teploty lití obecně vychází z teploty likvidu oceli stanovené výpočtem na základě předpisu chemického složení pro danou jakost, viz tab.5, a navýšením výsledné teploty o teplotu přehřátí.

Pro výpočet teploty likvidu jsem uvažoval se středním obsahem legujících a doprovodných prvků. Teplotu likvidu jsem dle Myslivce [10] stanovil následovně:

pro jakosti oceli GS80Cr (DIN17350) $T_{\text{likvidu}} = 1464^{\circ}\text{C}$

pro jakost oceli X40CrMoV51 (DIN17350) $T_{\text{likvidu}} = 1487^{\circ}\text{C}$

Tab. 5: Chemické složení vybraných jakostí

Jakost oceli	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
GS80Cr	0.80	0.40	0.45			2.00	0.30	
X40CrMoV51	0.40	0.40	1.00	0.035	0.035	5.00	1.00	0.30

Teplota přehřátí oceli nad teplotu likvidu zahrnuje zejména nezbytné navýšení teploty s ohledem na slévateľnost dané jakosti oceli pro zajištění bezpečného odlití jakostního ingotu. Obecně je nutné uvažovat i s teplotní ztrátou způsobenou odvodem tepla do vyzdívky pánve a okolního prostředí v průběhu transportu lící pánve na lící pole a po dobu vlastního odlévání ingotů.

Teplota lití (teplota oceli v pánvi) v současných podmínkách výroby oceli technologií EOP – LF – VD ve ŽDAS, a.s. se obecně stanovuje pro nástrojové oceli navýšením o 35 až 50°C nad technickou teplotu likvidu. Pro simulaci lití a tuhnutí ocelí GS80Cr a X40CrMoV51 jsem zvolil teplotu přehřátí 40°C:

$$\begin{array}{ll} \text{GS80Cr} & T_{\text{lití}} = T_{\text{likvidu}} + 40^{\circ}\text{C} = (1464 + 40)^{\circ}\text{C} = 1504^{\circ}\text{C} \\ \text{X40CrMoV51} & T_{\text{lití}} = T_{\text{likvidu}} + 40^{\circ}\text{C} = (1487 + 40)^{\circ}\text{C} = 1527^{\circ}\text{C} \end{array}$$

5.1.2 Rychlost lití ingotu

Rychlost lití oceli resp. odlévání ingotu je důležitý faktor s podstatným vlivem na výslednou povrchovou a vnitřní jakost ingotu.

Technologický předpis rychlosti lití ingotů vychází z provozních zkušeností a je definován na základě hmotnosti odlitého kovu v čase. Parametry pro odlévání ingotů 8K8,4, sledovaných jakostí nástrojových ocelí v podmínkách ŽDAS, a.s jsou patrné z tab. 6.

Tab. 6: Předpis lití ingotu 8K8,4 z ocelí GS80Cr a X40CrMoV51

8K8.4	Hmotnost ingotu			Lící rychlost		Čas lití	
	tělo ingotu	hlava ingotu	celkem	tělo ingotu	hlava ingotu	tělo ingotu	hlava ingotu
	(kg)			(t . min ⁻¹)		(min : s)	
	6 400	800	7 200	0.70	0.35	9:10	3:10

Jiný způsob stanovení lící rychlosti vychází z údaje o rychlosti stoupání hladiny tekutého kovu v kokile. Pro případ technologického předpisu ŽDAS, a.s. a velikosti ingotů 8K8,4 uvádí tab. 7 vypočtené hodnoty lící rychlosti, vyjádřené rychlostí stoupání hladiny v kokile.

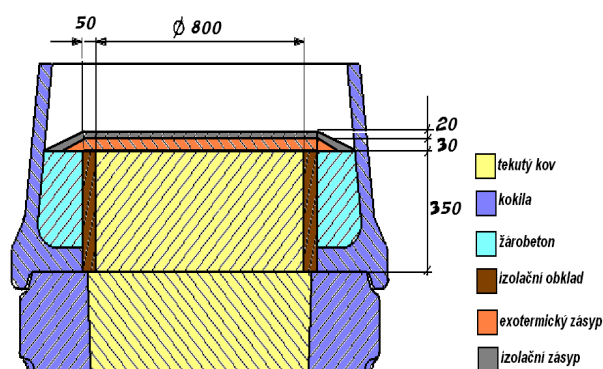
Tab. 7: Předpis lití ingotu 8K8,4 z pohledu rychlosti stoupání hladiny kovu v kokile

8K8.4	Výška kokily			Rychlost plnění	
	tělo ingotu	hlava ingotu	celkem	tělo ingotu	hlava ingotu
	(mm)			(mm . s ⁻¹)	
	1 660	350	2 010	3.0	1.8

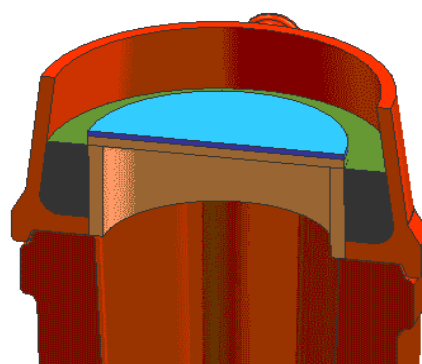
Z tab. 6 a tab. 7 jsou zřejmé podmínky rychlosti lití oceli pro numerické simulace lití a tuhnutí ingotu 8K8,4 z nástrojové oceli.

5.1.3 Ošetření hlavy ingotu

Ošetření hlavy ingotu jsem provedl v podmínkách MAGMASoft® v souladu s reálným stavem. Jedná se především o izolační obklad o tloušťce 50mm vložený v žárobetnem vyzděném hlavovém nástavci. Dále je horní část hlavy ošetřena nejdříve 30mm silnou vrstvou exotermického zásypu a pak 20mm vrstvou izolačního zásypu. Schéma sestavy hlavového nástavce uvádí obr. 22. a obr. 23.



Obr. 22: Schéma soustavy ingot – kokila - pomocné materiály



Obr. 23: Schéma sestavy hlavy a kokily ingotu 8K8,4 - MAGMASoft®

5.2 Simulace základní – původní stav výroby ve ŽĐAS, a.s.

Základní simulace ingotu 8K8,4 oceli GS80Cr jsem provedl v rámci úvodních prací. Hlavním měřítkem pro posouzení vnitřní kvality ingotu bylo Niyamovo kritérium, které je schopno modelovat úroveň vnitřních necelistvostí v závislosti na parametrech odlévání a tuhnutí – viz. níže.

V dalších krocích je popis provedených prací zaměřen na seznámení s výsledky simulace lití a tuhnutí ingotu z nástrojové oceli jakosti GS80Cr a X40CrMoV51 modifikovaného vzhledem k základní simulaci znázorňující původní stav.

Výsledky simulace lití a tuhnutí v následujících oblastech pro každou počítanou variantu jsem převedl do grafického vyjádření.

✓	Filling Velocity	- rychlost proudění tekutého kovu v kokile při odlévání ingotu
✓	Filling Temperature	- teplota po průřezu ingotu v průběhu tuhnutí tekutého kovu.
✓	FillTime (s)	- průběh plnění kokily tekutým kovem
✓	Coolrate (°C . s ⁻¹)	- rychlost ochlazování ingotu oceli
✓	Feeding (%)	- procentuální podíl homogenní fáze
✓	FSTime_30 (s)	- dosazovací schopnost tekuté fáze do místa tuhnutí
✓	GRADIENT (°C . mm ⁻¹)	- gradient teploty v průběhu ochlazování tekuté fáze
✓	HOTSPOT (s)	- místa posledního tuhnutí
✓	LIQTOSOL (s)	- čas taveniny v mezifázovém rozhraní teploty likvidu a solidu
✓	POROSITY (%)	- strukturní nespojitost materiálu
✓	SOLTIME (s)	- průběh pásma teploty solidu v závislosti na čase
✓	NIYAMA (1)	- kritérium pro vznik mikrostaženin
✓	Segregation	- koncentrace základních legujících a doprovodných prvků
✓	MaxPrincipalStres (MPa)	- poměrný lokální tlak
✓	MaxPrincipalStrain (MPa)	- poměrné lokální napětí
✓	Mises (MPa)	- porovnávací napětí

Hlavním měřítkem pro posouzení vnitřní kvality ingotu je v případě software MAGMASoft[®] stanovení tzv. Niyamova kriteria tj. kriteria pro vznik mikrostaženin v osových částech ingotu. Niyamovo kritérium je rozhodující pro vznik „mikrostaženin“ a je definované jako podíl

$$G / \sqrt{T} \quad (K^{1/2} \cdot s^{1/2} \cdot mm^{-1}) \quad (1)$$

G (K . mm⁻¹) je teplotní gradient

T (K . s⁻¹) rychlost ochlazování

Pro odlitky se uvádí jako kritická hodnota Niyamova kriteria $0,775 (K^{1/2} \cdot s^{1/2} \cdot mm^{-1})$ [25]. Při hodnotách vyšších než 0,775 dochází ke vzniku mikroporozity, případně vzniku staženin. Pro ingoty nejsou zatím známa praktická porovnání výsledků simulace s reálným stavem.

5.3 Simulace vlivu úpravy licích podmínek – změna licí rychlosti

K ověření možnosti zajištění vyhovující kvality ingotu 8K8,4 z nástrojové oceli jsem simuloval změny licích podmínek ve smyslu zvýšení resp. snížení licí rychlosti. Tato změna by mohla ve svém důsledku ovlivnit strukturu ingotu, umožnit odstranění vad definovaných kritériem Niyama a posunout tím oblast středové porozity směrem k hlavové části ingotu.

Licí rychlost v podmínkách numerické simulace ingotů jsem pak modifikoval z původního „normálního“ na nové „pomalé“ a „rychlé“ lití dle parametrů uvedených v tab. 8 a tab. 9.

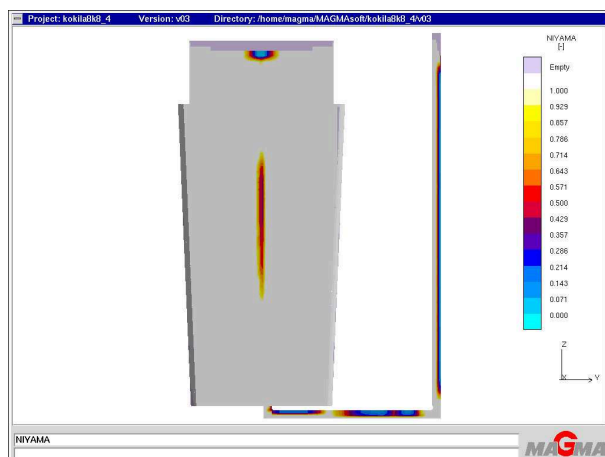
Tab. 8: Modifikace licích časů ingotu 8K8,4 z oceli GS80Cr

8K8.4	Hmotnost ingotu			Licí rychlost		Čas liti	
	tělo ingotu	hlava ingotu	celkem	tělo ingotu	hlava ingotu	tělo ingotu	hlava ingotu
	(kg)			(t . min ⁻¹)		(min : s)	
pomalé	6 400	800	7 200	0.7	0.35	9:40	3:10
normální				0.9		6:50	
rychlé				1.1		5:40	

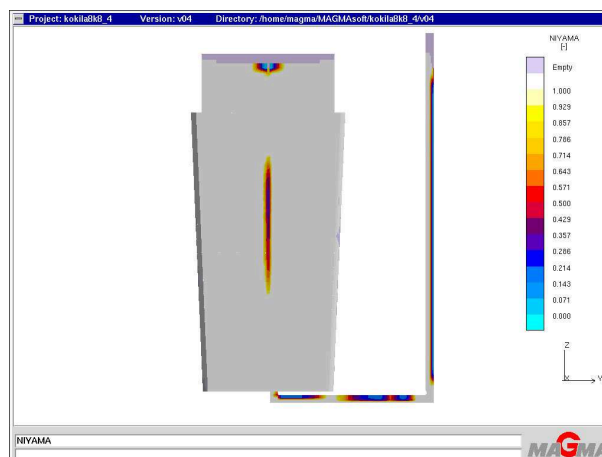
Tab. 9: Modifikace rychlosti plnění ingotu 8K8,4 z oceli GS80Cr

8K8.4	Výška kokily			Rychlost plnění	
	tělo ingotu	hlava ingotu	celkem	tělo ingotu	hlava ingotu
	(mm)			(mm . s ⁻¹)	
pomalé	1 660	350	2 010	3	2
normální				4	
rychlé				5	

Výsledky simulace změny licí rychlosti a jejího vlivu na strukturu osově části ingotu dokumentují obr. 24 a obr. 25. – Niyamovo kritérium



Obr. 24: 8K8,4 Niyama pomalé lití



Obr. 25: 8K8,4 Niyama rychlé lití

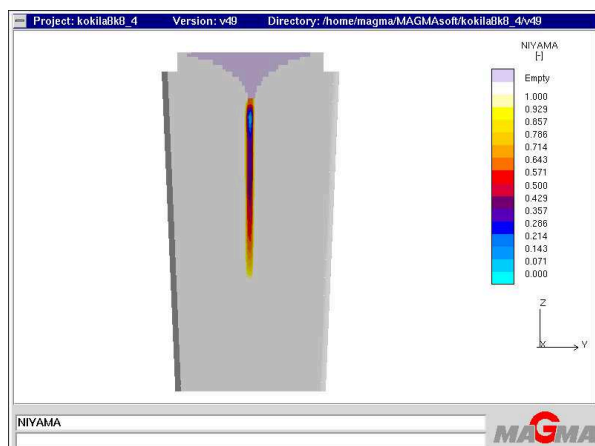
Ze snímků je zřejmé, že změna licí rychlosti má určitý vliv na hodnotu Niyamova kritéria a to především v osově části ingotu. I když to není zcela zřejmé, osová část ingotu na obr.24 je sice přibližně stejně velká, ale je světlejší než v případě obr.25. Vysvětlením může být jedině fakt, že na konci pomalu odlévaného ingotu je utuhlá větší část objemu ingotu od jeho povrchu ke středu, přičemž následně menší množství tekuté oceli v ose ingotu lépe dosadí vznikající osově mikrostaženiny a řediny při tuhnutí.

5.4 Simulace vlivu objemu tekutého kovu v hlavovém nástavci kokily

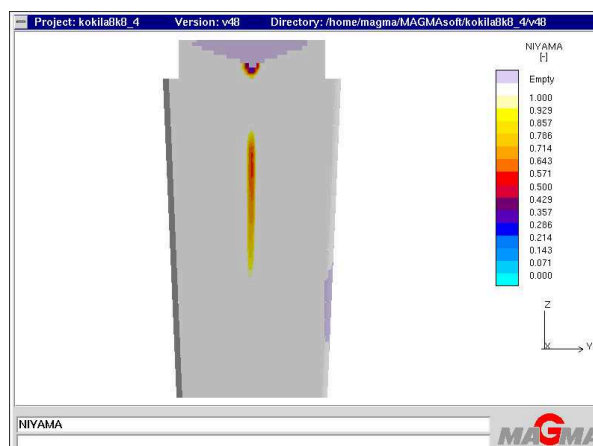
Dalším krokem v oblasti ověření současného stavu bylo ověření výšky hlavy ingotu a jejího vlivu na rozsah vady detekované kritériem Niyama.

Simulace jsem provedl pro materiál GS80Cr – chemické složení viz. tab.5, ingot 8K8,4 dle standardních podmínek pro odlévání, stanovených pro základní verzi a pro následující výšky hladiny kovu v ingotu po odlévání:

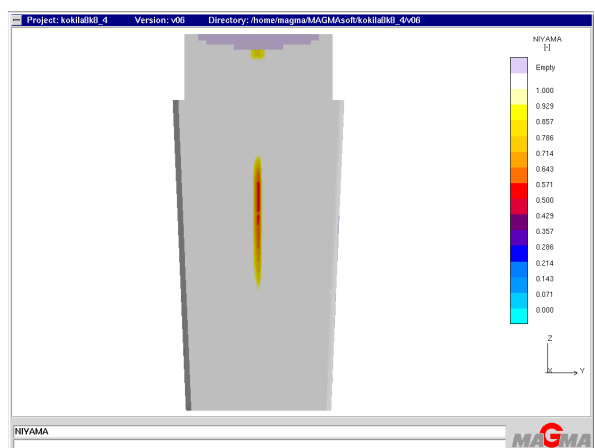
- a) Výška hladiny kovu v hlavě ingotu 100 mm – Obr.26
- b) Výška hladiny kovu v hlavě ingotu 200 mm – Obr.27
- c) Výška hladiny kovu v hlavě ingotu 300 mm – Obr.28 – základní verze
- d) Výška hladiny kovu v hlavě ingotu 400 mm – Obr.29



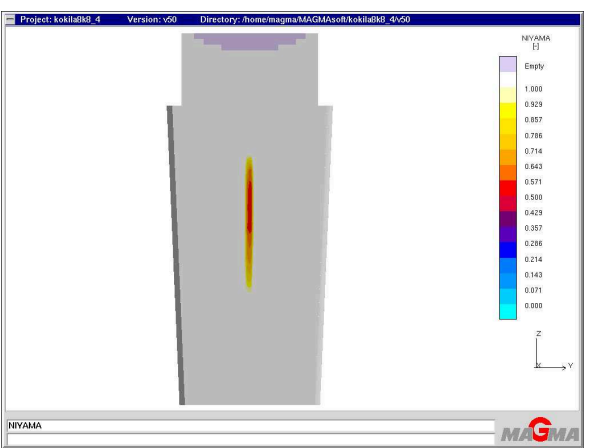
Obr. 26: Výška hladiny kovu v hlavě ingotu 100 mm



Obr. 27: Výška hladiny kovu v hlavě ingotu 200 mm



Obr. 28: Výška hladiny kovu v hlavě ingotu 300 mm – původní stav



Obr. 29: Výška hladiny kovu v hlavě ingotu 400 mm

Na základě výsledků těchto simulací bylo možné konstatovat, že v případě výšky hlavy ingotu menší jak 200mm zasahuje staženina do těla ingotu a úroveň Niyamova kritéria naznačuje vysoký výskyt osových vad. V případě výšky hlavy ingotu 200mm a více nebude již mít dále tento parametr výrazný vliv na rozsah osových vad detekovaných kritériem Niyama.

Další kroky v numerické simulaci, vedoucí k minimalizaci nebo úplnému odstranění vad detekovaných kritériem Niyama, spočívaly v modifikaci jak vnitřního, tak i vnějšího tvaru kokily.

Modifikace spočívaly v návrhu různých variant úprav vnějších i vnitřních rozměrů kokily, kde jedním z cílů bylo například zvýšit odvod tepla z ingotu a měnit tak rychlost chladnutí v různých částech ingotu.

5.5 Varianty úprav geometrie původního tvaru kokily 8K8,4

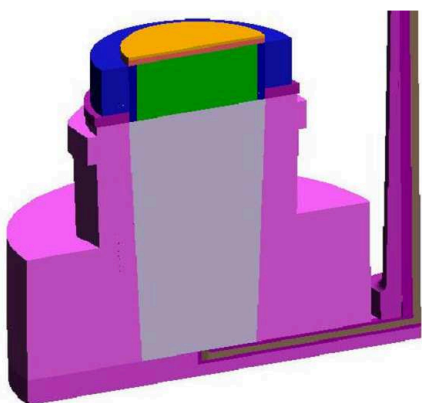
Změna geometrie tvaru kokily 8K8,4 – viz. tab. 4, byla v podmínkách numerické simulace v první fázi směřována k modifikaci vnějšího tvaru kokily, ve druhé fázi k modifikaci vnitřního tvaru kokily.

S uvažováním hodnot Niyamova kritéria bylo v této fázi hlavním cílem ověření možnosti změny vnějšího tvaru kokily bez zásahů do současné geometrie ingotu a s ohledem na úpravu podmínek tuhnutí vlivem odlišného odvodu tepla (kumulace nebo intenzivnějšího odvodu tepla) v porovnání s původním tvarem kokily [26].

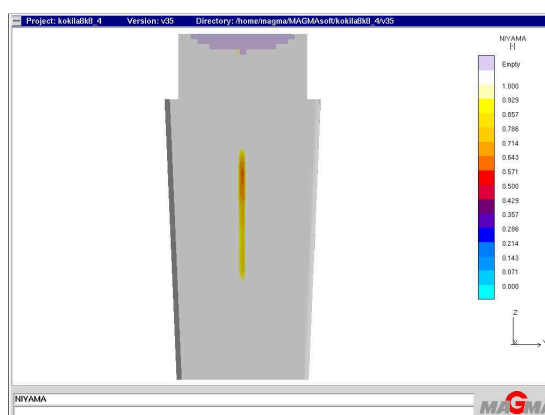
Možností řešení se nabízelo několik. Některé z nich jsou uvedeny dále.

5.5.1 Zesílení dolní poloviny těla kokily

Simulace tuhnutí ingotu změnou vnější části *dolní poloviny kokily* jejím zesílením byla provedena dle schématu na obr.30.



Obr. 30: Schéma zesílení kokily dole

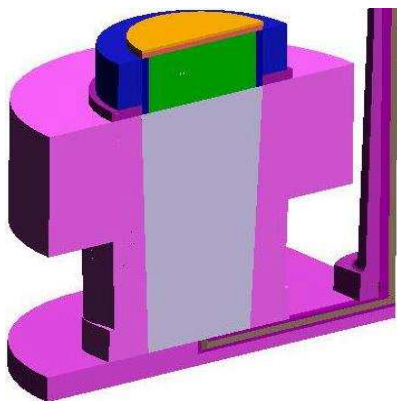


Obr. 31: Výsledek – kritérium Niyama

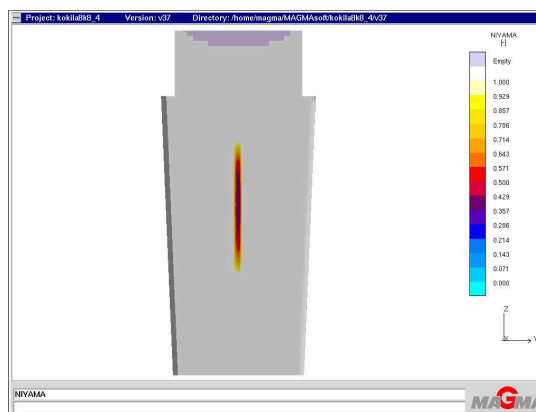
Extrémní zesílení tloušťky stěny až na trojnásobek původního rozměru, přineslo, jak je zřejmé z obr.31, mírné zlepšení v osově části ingotu z hlediska zasažení těla ingotu ředinami a dutinkami definovanými kritériem Niyama. Je to samozřejmě dáno především zvýšením odvodu tepla ve spodní části kokily čímž došlo k většímu usměrnění tuhnutí ingotu.

5.5.2 Zesílení horní poloviny těla kokily

Simulace tuhnutí ingotu změnou vnější části *horní poloviny kokily* jejím zesílením byla provedena dle schématu na obr.32.



Obr. 32: Schéma zesílení kokily nahoře

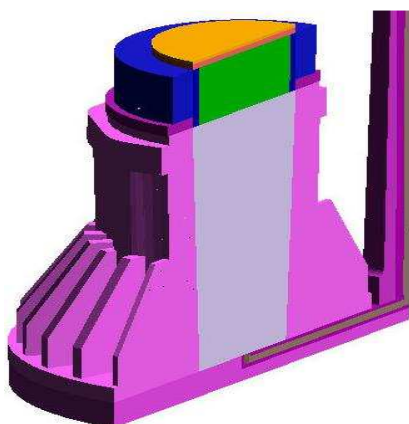


Obr. 33: Výsledek – kritérium Niyama

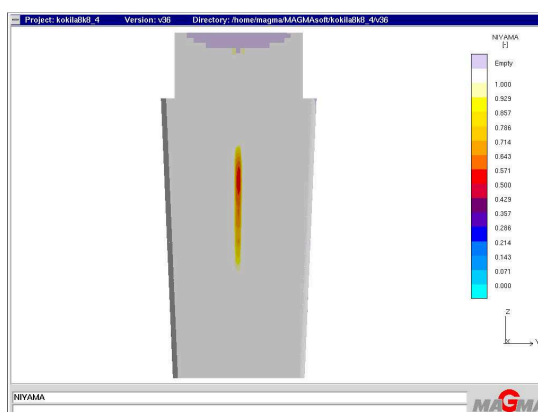
Z obr.33 je zřejmé, že extrémní zesílení tloušťky stěny v horní polovině kokily na trojnásobek původního rozměru přineslo významné zhoršení v osové části ingotu z hlediska zasažení těla ingotu ředinami a dutinkami definovanými kritériem Niyama. Jedná se prakticky o opak předchozího případu, kdy zvýšeným odvodem tepla v horní části kokily dojde k uzavření hlavy ingotu „zaškrcení pod hlavou“ a kov již z hlavy nemá možnost při tuhnutí těla dosazovat.

5.5.3 Žebrování dolní poloviny těla kokily

Ovlivnění podmínek tuhnutí ingotu vnějším žebrováním kokily v dolní polovině bylo provedeno dle schématu na obr.34. Žeber je dokola 24, sahají do výšky poloviny kokily, jejich základna je trojnásobek tloušťky kokily a tloušťka žeber je 50mm. Tato varianta je podobná variantě v kap. 4.5.1 s tím rozdílem, že žebrování vytváří větší plochu k ochlazování.



Obr. 34: Schéma žebrování kokily dole

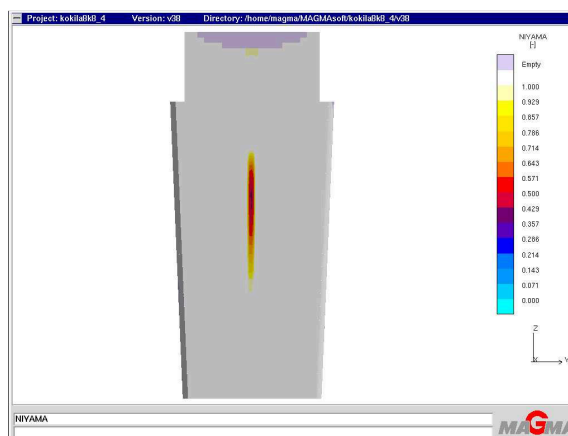
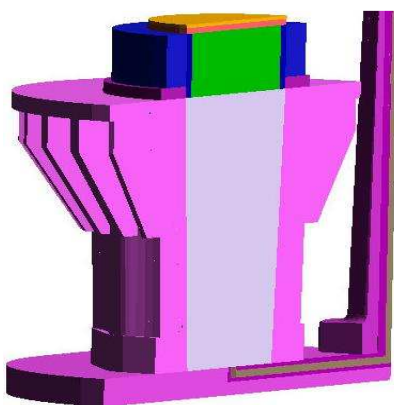


Obr. 35: Výsledek – kritérium Niyama

Výsledek varianty žebrování spodní poloviny kokily je zřejmý z obr.35. Představuje mírné zlepšení v osově části ingotu z hlediska kriteria Niyama, obdobně jako varianta zesílení kokily ve spodní části. Je to opět dáno zvýšením odvodu tepla ve spodní části kokily a tím k většímu usměrnění tuhnutí ingotu. Žebrování však oproti předpokladu nepotvrdilo účinek větší plochy a tím intenzivnějšího ochlazování.

5.5.4 Žebrování horní poloviny těla kokily

Simulace tuhnutí ingotu v kokile s vnějším žebrováním v horní polovině byla provedena na sestavě dle schématu na obr.36. Opět dokola 24 žeber silných 50mm a sahajících do poloviny kokily. Je to obdoba varianty v kap. 4.5.2 ovšem opět s větší ochlazovanou plochou, která je dána právě žebrováním proti válcovému tvaru.



Obr. 36: Schéma žebrování kokily nahoře

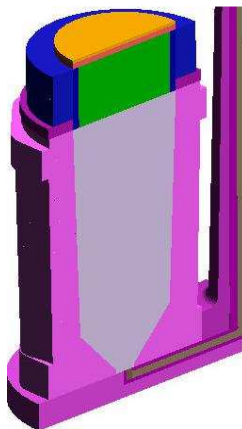
Obr. 37: Výsledek – kritérium Niyama

Výsledek varianty žebrování horní poloviny kokily je zřejmý z obr.37. Představuje opět zhoršení v osově části ingotu z hlediska kriteria Niyama, obdobně jako varianta zesílení kokily v horní části uvedená v kap. 4.5.2. Znovu je proti této variantě zřejmý nižší ochlazovací účinek žeber jak je znázorněno na obr.36.

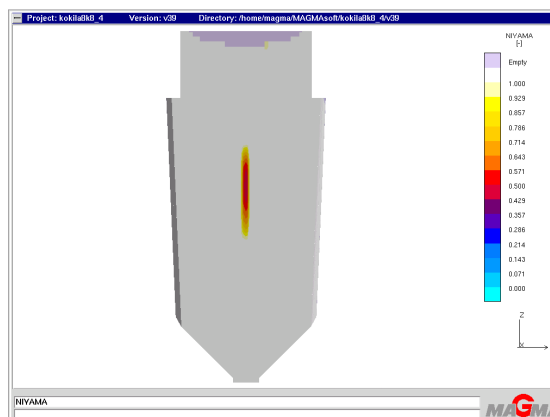
Shrneme-li předchozí čtyři varianty lze na nich jednoznačně pozorovat ovlivňování kvality osově části ingotu dané kritériem Niyama, ale v žádném z těchto případů, což je ze simulací zřejmé, se tento negativní jev nepodařilo zcela odstranit. Osová porezita se nacházela vždy ve středové části ingotu.

5.5.5 Zkosení patní části uvnitř kokily

Návrh simulace tuhnutí ingotu v kokile se *zkosením patní části uvnitř kokily* pod úhlem 45° vycházel z předpokladu výhodnějších podmínek pro dosažení usměrněného tuhnutí. Schéma uvádí obr.38.



Obr. 38: Schéma zkosení v patě kokily



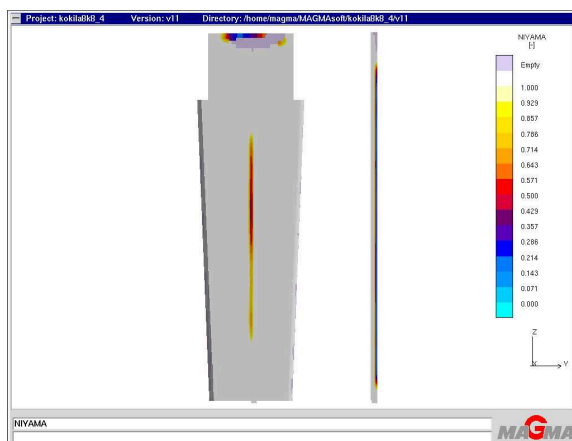
Obr. 39: Výsledek – kritérium Niyama

Kuželový tvar spodní části ingotu, jak je patrné z obr.39, způsobil v osově části ingotu viditelné zkrácení vady – porezity, definované kritériem Niyama. Vada však v zásadě ani v tomto případě odstraněna nebyla.

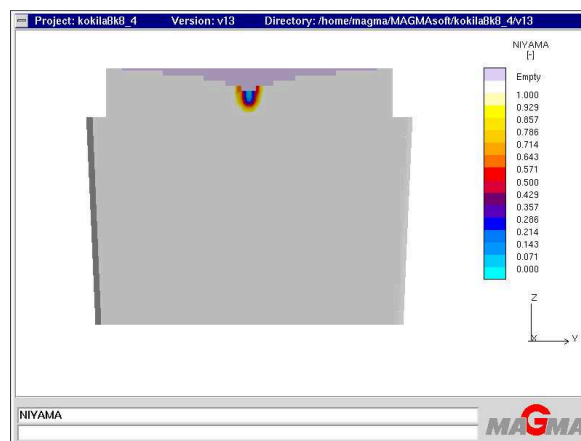
5.5.6 Změna poměru H/D (výška ingotu / střední průměr)

Další změny geometrie byly zaměřeny na úpravu *vnitřního* tvaru dutiny kokily resp. vlastního ingotu. Byl upravován poměr H/D původní kokily **8K8,4** ($1630\text{mm}/840\text{mm} = 1,9$).

Extrémní varianty H/D (**H/D 2640mm/660mm = 4,0** vs. **H/D 810mm/1190mm = 0,70**) byly v rámci numerických simulací realizovány s cílem ověření předpokladu působení hodnoty H/D na vnitřní jakost ingotu. Podmínky odlévání byly pro obě simulace stejné včetně objemu odlévaného kovu. Výsledky simulací z hlediska kritéria Niyama uvádí obr.40 a 41.



Obr. 40: $H/D = 4,0$ – kritérium Niyama

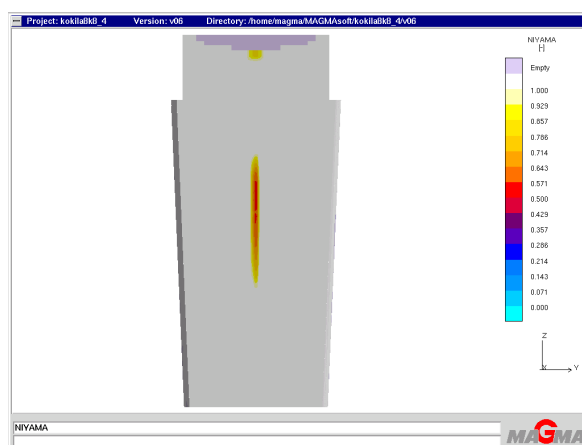


Obr. 41: $H/D = 0,7$ – kritérium Niyama

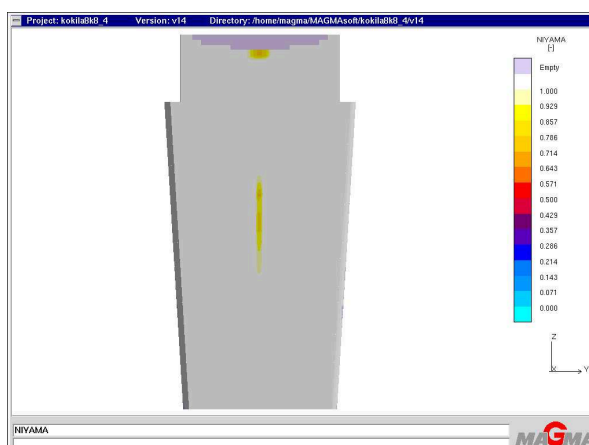
Z obr.40 je zřejmé, že zvýšení poměru proti původnímu ingotu $H/D = 1,99$ na $H/D = 4,0$ nepředstavuje zlepšení podmínek tuhnutí a zvýšení jakosti osově části ingotu z hlediska kritéria Niyama. Obr.41, dokumentující výsledek numerické simulace při snížení poměru $H/D = 1,99$ na $H/D = 0,7$ naopak dokladuje úplné potlačení osově vady ingotu – porezity, definované kritériem Niyama.

5.5.7 Změna úkosu kokily

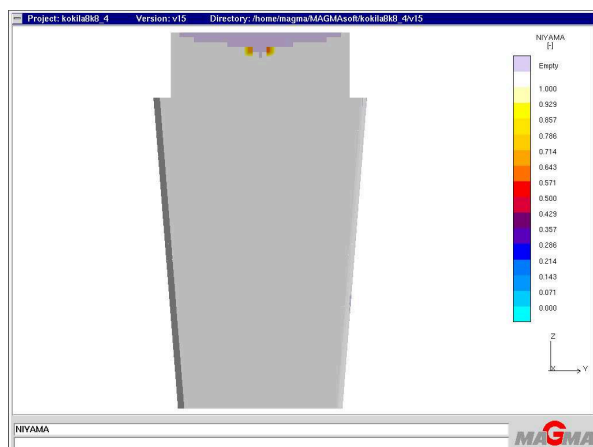
Další simulace lití a tuhnutí ingotu při změně vnitřní geometrie kokily jsem zaměřil na ověření vlivu úkosu stěn kokily resp. ingotu na rozsah již zmiňované vady definované kritériem Niyama, přičemž původní kokila **8K8,4** prezentuje úkos **2.1°**. Změnou (zvětšením) úkosu těla kokily na hodnoty 2.4°, 3.5°, 4.5° a 6.5° se očekávalo pozitivní ovlivnění osově části ingotu. Je to ostatně patrné z níže uvedených obr.42 až obr.45. Opět změnou úkosu stěn ovlivňujeme usměrňenost tuhnutí ingotu.



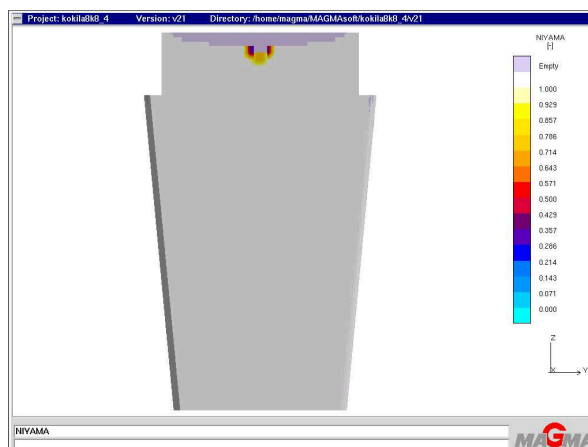
Obr. 42: 8K8,4 - úkos 2,4° - Niyama



Obr. 43: 8K8,4 - úkos 3,5° - Niyama



Obr. 44: 8K8,4 - úkos 4,5° - Niyama



Obr. 45: 8K8,4 - úkos 6,5° - Niyama

Na základě výsledků na obr.43 je zřejmé, že zvýšení úkosu o 1,1° proti původnímu 2,1° u ingotu 8K8,4 přineslo mírné zlepšení v oblasti osy napadené porézností. Další zvýšení úkosu z hodnoty 3,5° na 4,5° znamená úplné odstranění vady dle kritéria Niyama.

Při zvýšení úkosu až na hodnoty 6,5° již ke změně nedochází a osová část ingotu je opět bez detekcí této vady.

5.6 Verze zvětšení patního průměru a modifikace průřezu ingotu

Na základě výsledků předchozích simulací jsem přistoupil ke komplexní úpravě geometrie kokily a ověření navržených variant. Změny proti původnímu tvaru kokily 8K8,4 byly směřovány do oblasti jednak zvýšení poměru H/D a zároveň zvětšení úkosu stěny ingotu.

Různé varianty geometrie ingotu byly následně simulací ověřovány a to opět z hlediska již známého kritéria Niyama, ale dále také z hlediska vnitřních porovnávacích – relativních napětí v ingotu označované jako Mises [Mpa].

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad [\text{Mpa}] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 & - \text{hlavní osová napětí} \\ \bar{\varepsilon} & - \text{efektivní napětí} \end{aligned} \quad [\text{Mpa}]$$

Výše uvedený vzorec pro efektivní deformaci (podobně i efektivní napětí) popisuje chování materiálu podle Von Misesa tzv. trojosý stav deformace (popř. napjatosti). Je to tedy hodnota deformace popisující stav materiálu ve všech třech směrech. [19]

S pomocí relativních napětí Mises lze porovnávat trojosý napěťový stav s jednoosým napěťovým stavem (trhací zkouškou), tzn. že výsledky napětí můžeme přímo porovnat s výsledky meze kluzu a pevnosti při měření vlastností materiálu zkouškou tahem.

Změny proti původnímu tvaru kokily 8K8,4 byly směřovány do oblasti:

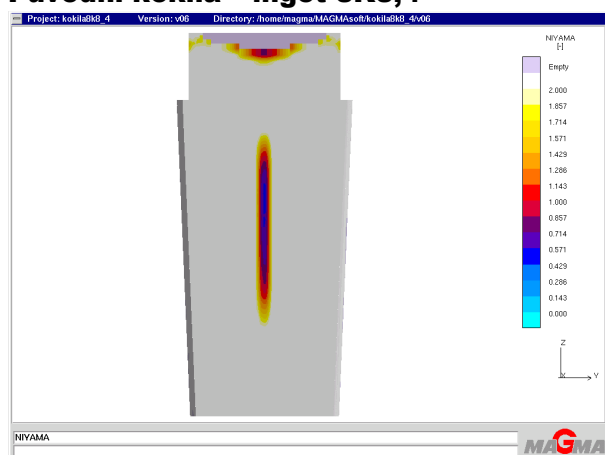
- a) zvýšení poměru H/D
- b) zvětšení úkosu

V rámci navrhovaných změn tvaru ingotu jsem realizoval i zvětšení patního průměru. Návrh nového tvaru ingotu resp. kokily byl proti původnímu patnímu rozměru ingotu 8K8,4 $D_{\text{patní}} = 842 \text{ mm}$ zvětšen na $D_{\text{patní}} = 900 \text{ mm}$, přičemž hmotnost ingotu byla nezměněna.

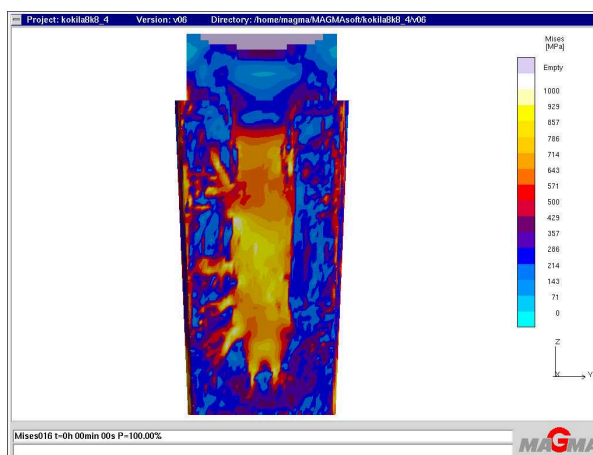
Modifikace průřezu ingotu souvisela s ověřením vlivu konvexních stěn tvaru kokily v porovnání s rovnými plochami stěn kokily na jakost ingotu z hlediska kritéria Niyama ve škále 0 až 2 a dále z hlediska vnitřních porovnávacích – relativních napětí v ingotu označované Mises [Mpa].

Numerickou simulací lití a tuhnutí v podmínkách softwaru MAGMASoft® jsem pak ověřoval varianty kokily resp. ingotu s patním průměrem 900 mm s úkosem od $4,5^\circ$ až $6,0^\circ$ pro konvexní a rovné plochy stěn kokily. Výsledky původního ingotu resp. tvaru kokily pro porovnání se změnami dokumentují obr. 46 a obr. 47.

Původní kokila – ingot 8K8,4



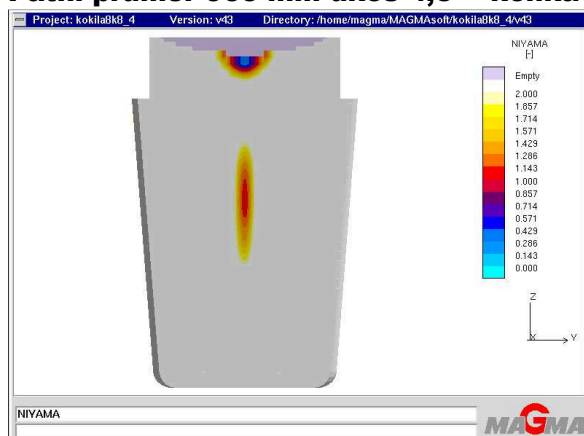
Obr. 46: Niyama 0 – 2



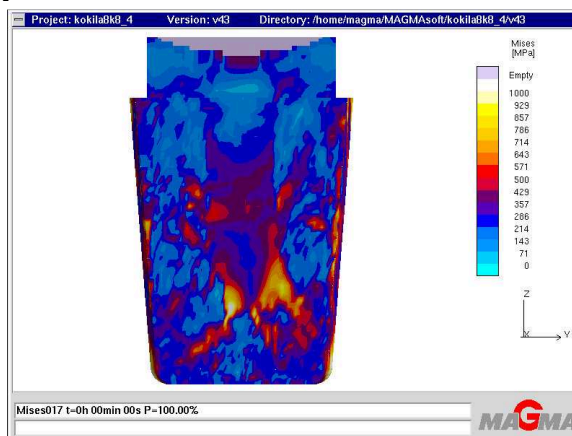
Obr. 47: Mises

Obr. 48 až obr. 59 dokumentují výsledky numerické simulace pro vybrané modifikace tvaru kokily resp. ingotu. Zkoumal jsem rovněž vliv tvaru stěn ingotu a to buď s rovnými stěnami (rovnostěnný) nebo se stěnami propadlými dovnitř ingotu (konkávní), za účelem zvětšení vnitřní plochy stěn kokily a tím zvětšení odvodu tepla do stěn.

Patní průměr 900 mm úkos 4,5° - konkávní

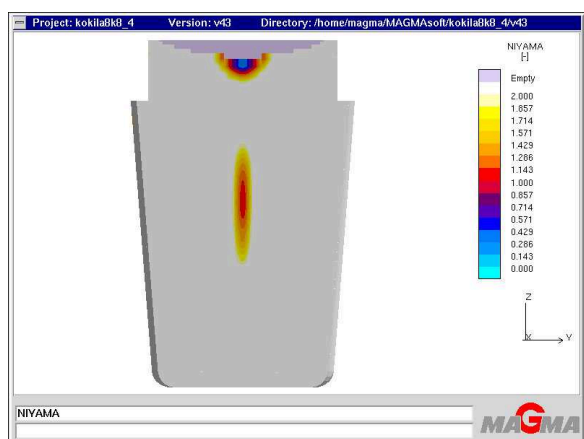


Obr. 48: Niyama 0 – 2

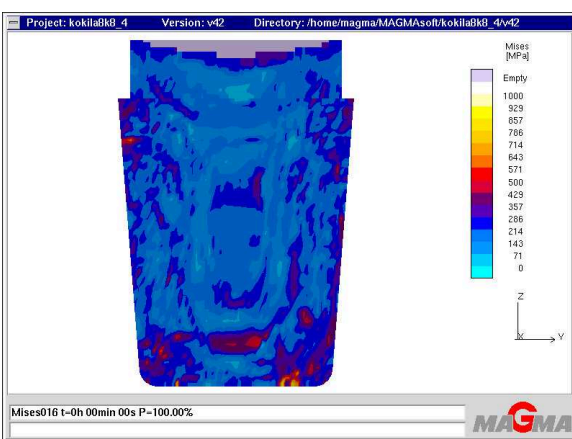


Obr. 49: Mises

Patní průměr 900 mm úkos 4,5° - rovnostěnný

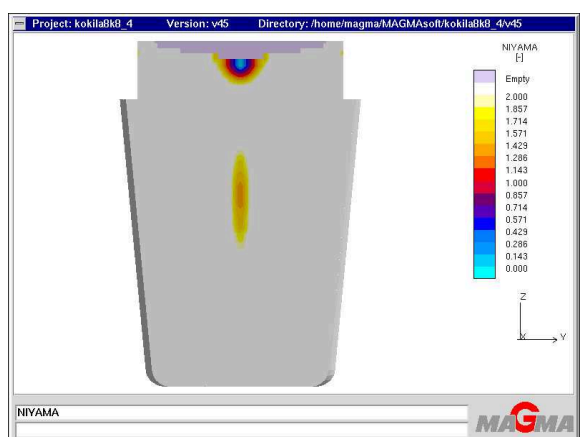


Obr. 50: Niyama 0 – 2

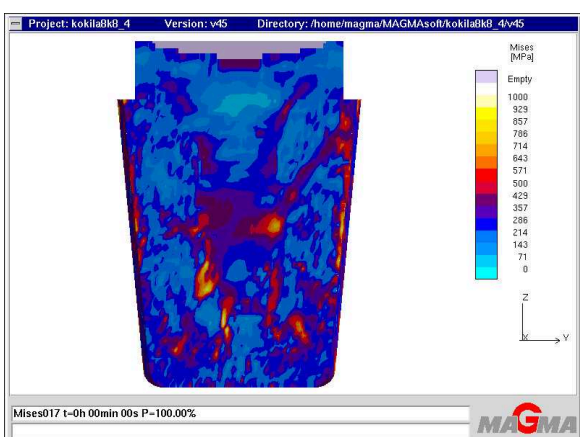


Obr. 51: Mises

Patní průměr 900 mm úkos 5,5° - konkávní

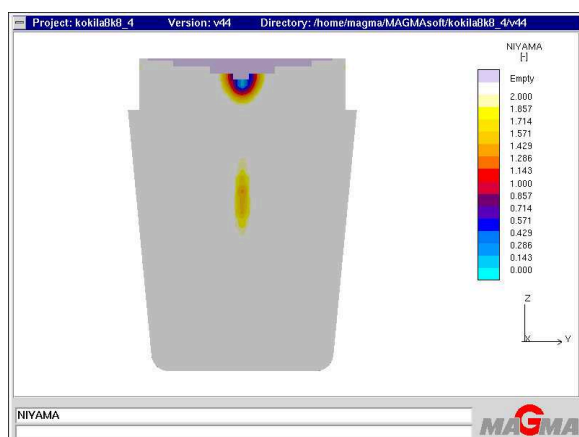


Obr. 52: Niyama 0 – 2

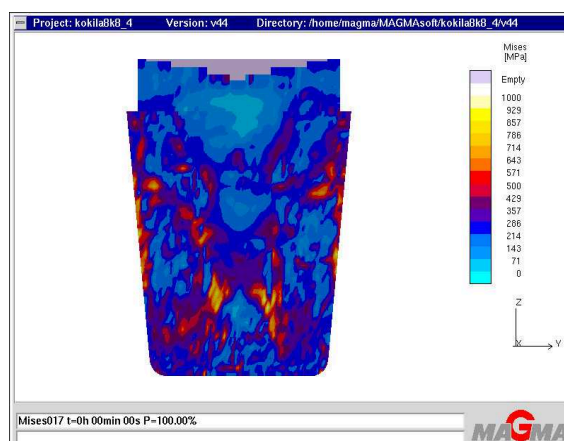


Obr. 53: Mises

Patní průměr 900 mm úkos 5,5° - rovnostěnný

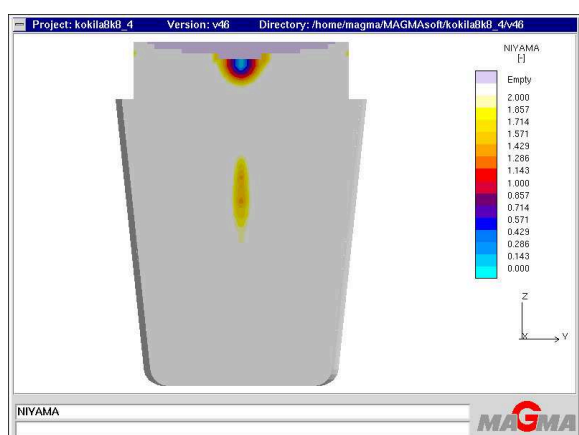


Obr. 54: Niyama 0 – 2

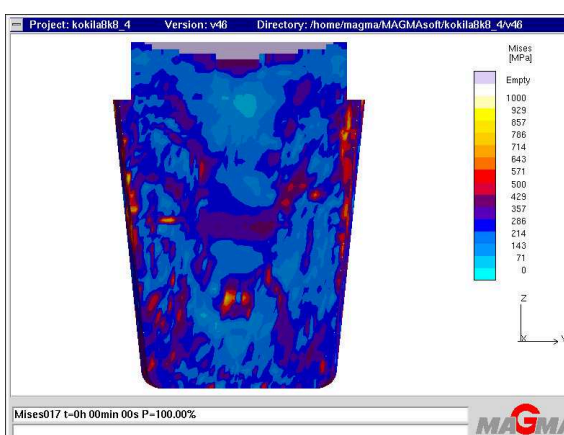


Obr. 55: Mises

Patní průměr 900 mm úkos 6,0° - konkávní

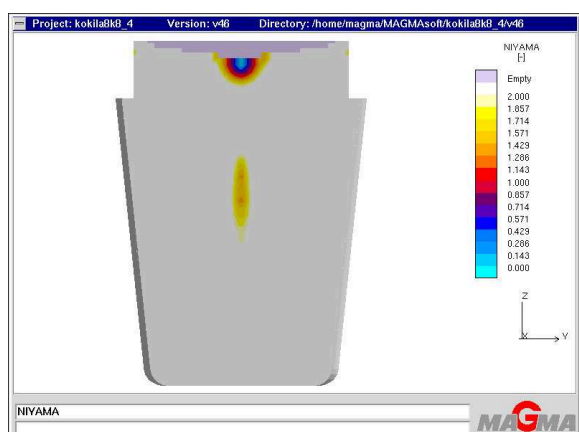


Obr. 56: Niyama 0 – 2

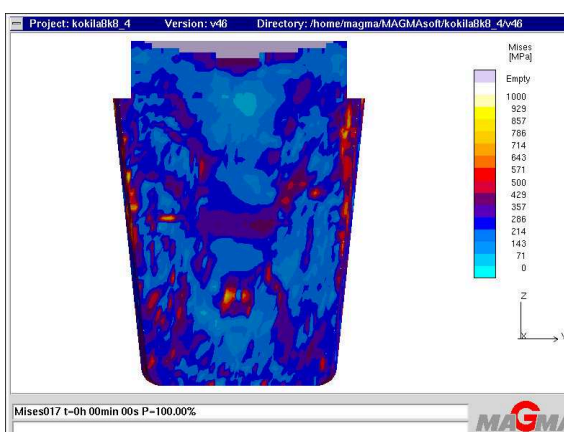


Obr. 57: Mises

Patní průměr 900 mm úkos 6,0° - rovnostěnný



Obr. 58: Niyama 0 – 2



Obr. 59: Mises

Výsledky ověřovaných variant tvaru kokily numerickou simulací lití a tuhnutí ingotů s patním průměrem $D_{\text{patní}} = 900 \text{ mm}$ a rozdílných průřezích ingotu, potvrzují z hlediska kritéria Niyama ve škále 0 až 2 pozitivní vývoj a eliminaci vady v ose ingotu v závislosti na rostoucím úkosu stěn kokily v rozpětí od $4,5^\circ$ až do $6,0^\circ$.

Vliv tvaru průřezu ingotu, tedy jednak konvexních a jednak rovných stěn kokily, se na hodnotách a rozsahu vady dle kritéria Niyama významně neprojevil.

Z hlediska vnitřních porovnávacích – relativních napětí v ingotu Mises [Mpa], lze konstatovat opět pozitivní vliv zvětšení úkosu v porovnání s původním stavem (8K8,4). V závislosti na rostoucím úkosu stěn kokily v rozpětí od $4,5^\circ$ až do $6,0^\circ$ nejsou zřejmé další významné změny hodnot vnitřních porovnávacích – relativních napětí v ingotu Mises [Mpa].

Vliv tvaru průřezu ingotu, tedy jednak konvexních a jednak rovných stěn kokily, se na hodnotách vnitřních porovnávacích – relativních napětí v ingotu Mises [Mpa], významně projevil pouze v případě verze ingotu s úkosem $4,5^\circ$ (obr. 49 vs. obr. 51) přičemž, hodnoty relativních napětí v ingotu lze konstatovat u varianty s rovnými stěnami.

Při dalším zvýšení úkosu stěn kokily prakticky nedochází k rozdílům v hodnotách vnitřních porovnávacích – relativních napětí v ingotu Mises [Mpa], v porovnání rozdílných průřezů ingotů při stejném úkosu.

5.7 Verze návrhu nové kokily 8K9,2

Na základě analýz a provedených numerických simulací jsem navrhnul nový tvar kokily, pracovně označený 8K9,2. Jedná se o kokilu pro odlévání ingotu o větší hmotnosti (8 900 kg), se zvětšenými rozměry horního a patního průměru a sníženou výškou, což se promítlo do zmenšení štíhlosti z původních 1,99 na 1,33. Ingot je tedy typický následujícími odchylkami od původního tvaru ingotu 8K8,4 – viz. tab.10. [27], [28], [29].

Tab. 10: Porovnání rozměrů ingotu 8K8,4 a 8K9,2

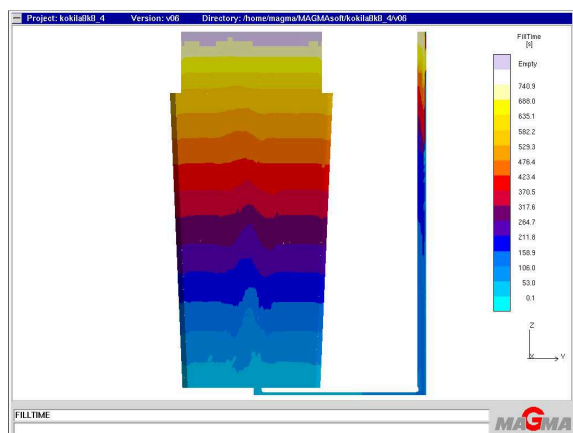
Ingot	8K8,4	8K9,2	odchylka
Hmotnost:	7 600 kg	8 900 kg	+ 1 400 kg
Patní průměr	842 mm	910 mm	+ 68 mm
Horní průměr	974 mm	1 190 mm	+ 216 mm
Výška těla	1 660 mm	1 300 mm	- 360 mm
Poměr H/D	1,99	1,33	- 0,66
Úkos	$2,1^\circ$	$5,7^\circ$	+ $3,6^\circ$

Další konstrukční úprava tvaru kokily byla provedena ve smyslu zvýšení využití ingotu. Uzavření patní části kokily umožňuje odlévání ingotů bez ošetření ocelovými broky a tedy bez znečištění patní části ingotu cizím materiálem.

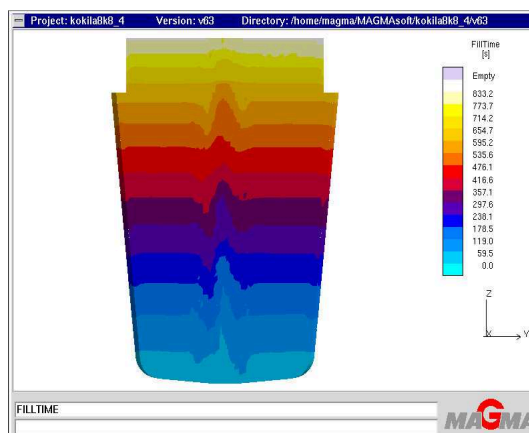
Výsledky numerické simulace lití a tuhnutí ingotu do kokily 8K9,2, dle návrhu a v porovnání s výsledky simulace lití ingotu do původní kokily 8K8,4, jsou zřejmé z následujících obrázků.

obr. 60 a 61	FillTime (s)	- průběh plnění kokily tekutým kovem
obr. 62 a 63	Coolrate ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	- rychlost ochlazování ingotu oceli
obr. 64 a 65	Feeding (%)	- procentuální podíl homogenní fáze
obr. 66 a 67	FSTime_30 (s)	- dosazovací schopnost tekuté fáze do místa tuhnutí
obr. 68 a 69	GRADIENT ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}^{-1}$)	- gradient teploty v průběhu ochlazování tekuté fáze
obr. 70 a 71	HOTSPOT (s)	- místa posledního tuhnutí
obr. 72 a 73	LIQTOSOL (s)	- čas taveniny v mezifázovém rozhraní likvidu a solidu
obr. 74 a 75	POROSITY (%)	- strukturní nespojitost materiálu
obr. 76 a 77	SOLTIME (s)	- průběh pásma teploty solidu v závislosti na čase
obr. 78 a 79	NIYAMA (1) škála 0 až 1	- kritérium pro vznik mikrostaženin
obr. 80 a 81	NIYAMA (1) škála 0 až 2	- kritérium pro vznik mikrostaženin
obr. 82 a 83	Segregation	- koncentrace C
obr. 84 a 85	Segregation	- koncentrace Cr
obr. 86 a 87	Segregation	- koncentrace Mo
obr. 88 a 89	Segregation	- koncentrace Mn
obr. 90 a 91	MaxPrincipalStres (MPa)	- poměrný lokální tlak
obr. 92 a 93	MaxPrincipalStrain (MPa)	- poměrné lokální napětí
obr. 94 a 95	Mises (MPa)	- porovnávací napětí

obr. 60 a 61 FillTime (s) - průběh plnění kokily tekutým kovem



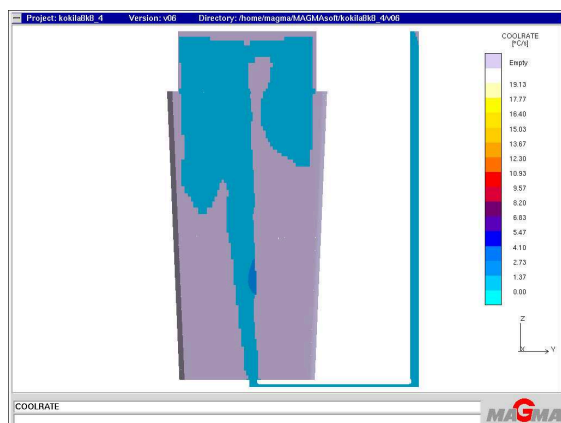
Obr. 60: 8K8,4 - FillTime (s)



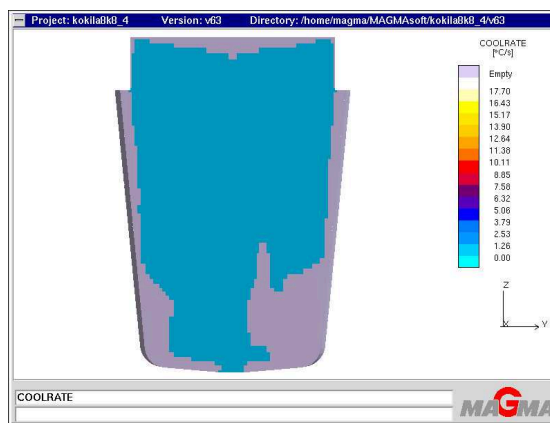
Obr. 61: 8K9,2 - FillTime (s)

Obrázky dokumentují průběh plnění kokil tekutým kovem, přičemž kokila 8K8,4 byla naplněna tekutým kovem v objemu 7,6t v čase 740s a kokila 8K9,2 tekutým kovem v objemu 8,9t v čase 833s, což v obou případech odpovídá rychlosti odlévání $0,6 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1}$.

obr. 62 a 63 Coolrate ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) - rychlost ochlazování ingotu



Obr. 62: 8K8,4 - Coolrate ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)

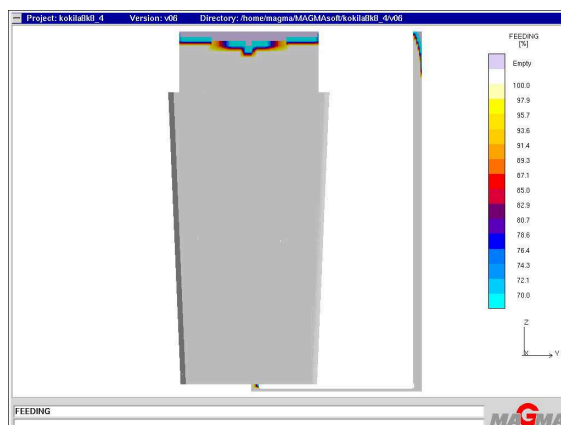


Obr. 63: 8K9,2 - Coolrate ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)

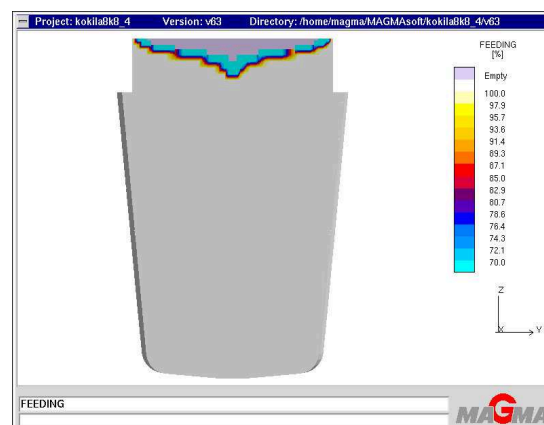
Schematické obrázky zobrazují ochlazovací rychlost materiálu při zvolené teplotě oceli. Tzn. okamžitou ochlazovací rychlost při dosažení lokální teploty kovu těsně nad teplotou likvidu ($T_{\text{likvidu}} + 2^{\circ}\text{C}$).

Kriterium je s úspěchem aplikováno při analýze tenkostěnných odlitků, ale v našem případě, vzhledem k masivnímu objemu kovu a velmi nízkému teplotnímu gradientu, neposkytuje očekávané výsledky. Na obrázku jsou pouze patrné oblasti, kde v ingotu došlo k poklesu teploty oceli pod teplotu likvidu již v průběhu plnění kokily tekutým kovem.

obr. 64 a 65 Feeding (%) - procentuální podíl homogenní fáze



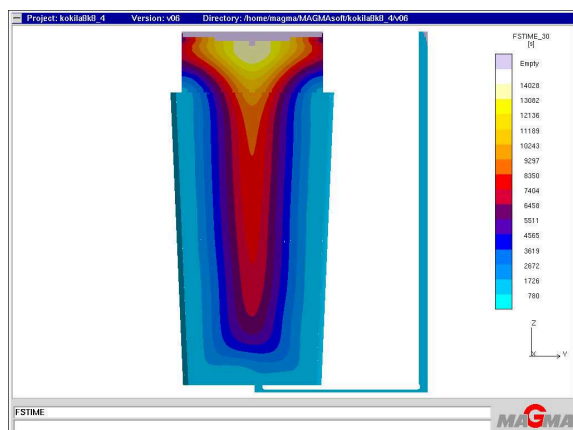
Obr. 64: 8K8,4 - Feeding (%)



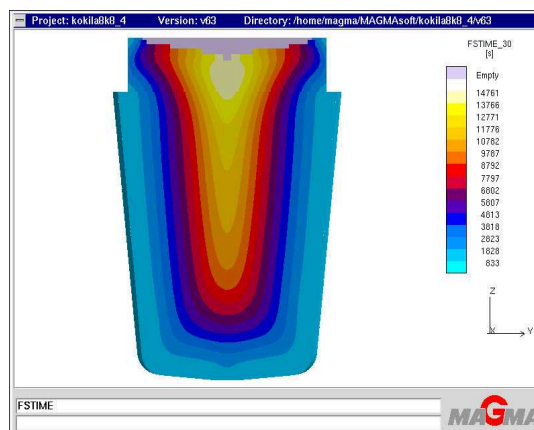
Obr. 65: 8K9,2 - Feeding (%)

Numerický model poskytuje informaci o dostatečném ošetření hlavového nástavce ingotu, dosažení usměrněného tuhnutí a koherentní struktury materiálu těla ingotu. Pásma nespojivosti materiálu se nachází v hlavě ingotu, v místě předpokládaného výskytu primární staženiny.

obr. 66 a 67 FSTime 30 (s) - dosazovací schopnost tekuté fáze do místa tuhnutí



Obr. 66: 8K8,4 - FSTime_30 (s)

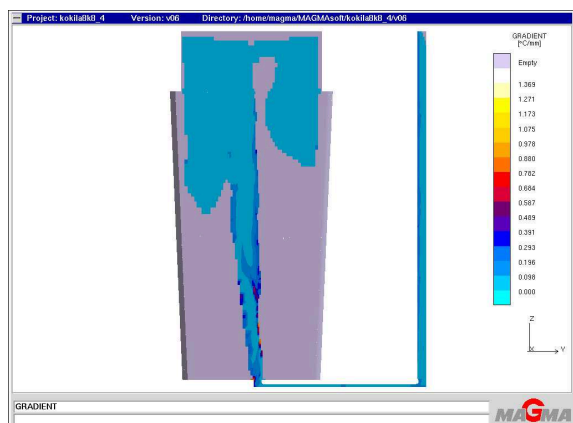


Obr. 67: 8K9,2 - FSTime_30 (s)

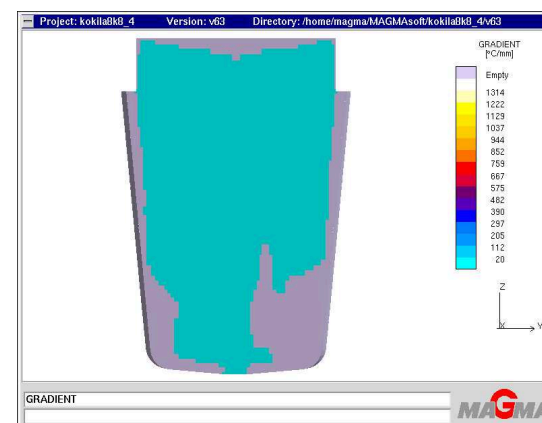
Z obr. 66 a 67 je zřejmá časová závislost schopnosti tekutého kovu dosazovat v průběhu tuhnutí tekutou fází do místa tuhnutí. U kokily 8K8,4 je možné konstatovat zvýšené riziko špatného dosazování tekutého kovu do střední části těla ingotu. U kokily 8K9,2 je pak uvedený negativní efekt potlačen.

Úhel rozevření rozhraní mezi tekutou a tuhou fází je velmi ostrý a podstatně se zvětšuje vzdálenost mezi špičkami časového průběhu izotermy v ose těla ingotu. V důsledku toho lze konstatovat sníženou dosazovací schopnost v osové části ingotu, zejména v oblasti zasahující tělo od 1/4 výšky ingotu ve směru od paty až do místa těsně pod hlavou ingotu.

obr. 68 a 69 GRADIENT ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}^{-1}$) - gradient teploty v průběhu ochlazování tek. fáze



Obr. 68: 8K8,4 - GRADIENT ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}^{-1}$)

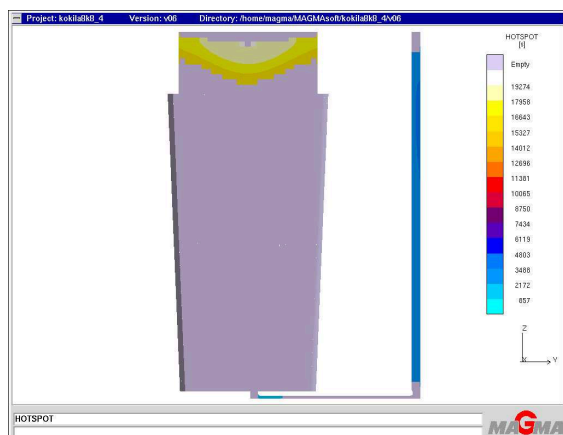


Obr. 69: 8K9,2 - GRADIENT ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}^{-1}$)

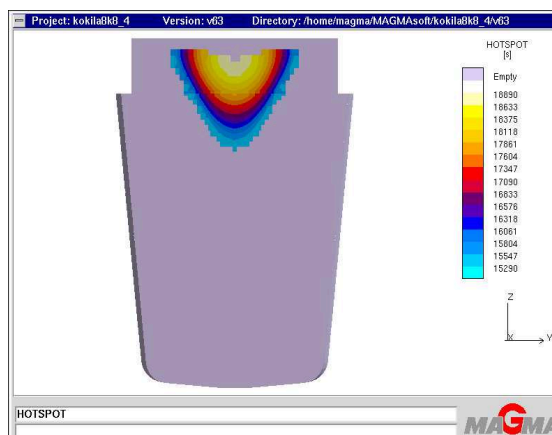
Numerický model, obdobně jako v případě rychlosti ochlazování ingotu oceli Coolrate [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$], zobrazuje vybranou funkci při zvolené teplotě oceli.

Gradient teploty ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}^{-1}$) při zvolené teplotě kovu těsně nad teplotou likvidu ($T_{\text{likvidu}} + 2^{\circ}\text{C}$) dosahuje lokálně hodnot blížících se 0. Kriterium i zde v případě masivního objemu kovu neposkytuje očekávané výsledky.

obr. 70 a 71 HOTSPOT (s) - místa posledního tuhnutí



Obr. 70: 8K8,4 - HOTSPOT (s)

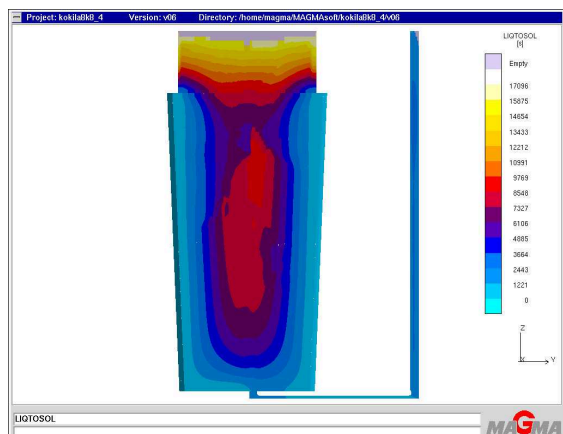


Obr. 71: 8K9,2 - HOTSPOT (s)

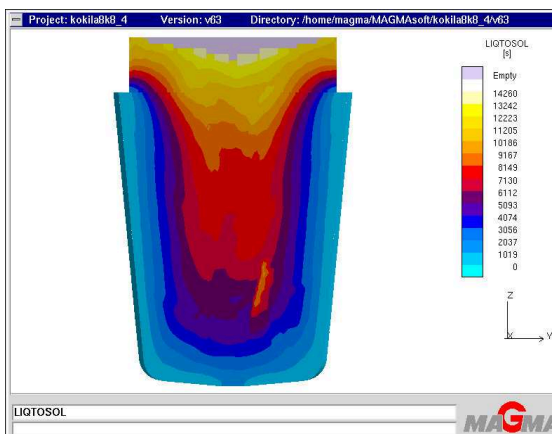
Kriterium HOTSPOT (s) sleduje místa posledního tuhnutí tekuté fáze. Z hlediska tuhnutí ingotu 8K8,4, v souladu s výsledkem kritéria dosazovací schopnosti tekuté fáze do místa tuhnutí FSTime_30 [s], se místo posledního tuhnutí nachází mimo tělo ocelového odlitku - ingotu.

V případě ingotu 8K9,2 existuje při nedostatečném ošetření hlavy ingotu v průběhu tuhnutí zřejmé riziko vzniku primární staženiny zasahující do těla ingotu.

obr. 72 a 73 LIQTOSOL (s) - čas taveniny v mezifázovém rozhraní likvidu a solidu



Obr. 72: 8K8,4 - LIQTOSOL (s)

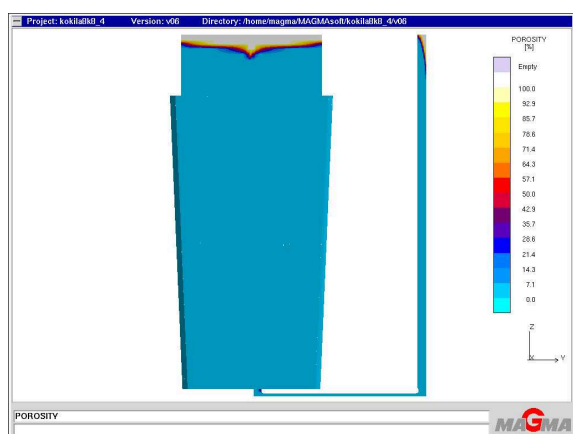


Obr. 73: 8K9,2 - LIQTOSOL (s)

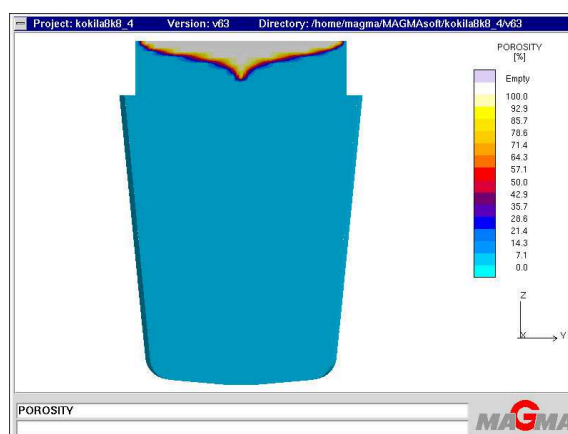
Výsledek numerického stanovení času, kdy tekutá fáze setrvává v mezifázovém rozhraní teploty likvidu a solidu LIQTOSOL [s] poskytuje, v porovnání s parametrem FSTime_30 [s], odpovídající výsledky a potvrzuje riziko uzavření izotermických křivek pro dosazování tekutého kovu do těla ingotu 8K8,4.

V případě ingotu 8K9,2 je uzavření izotermických křivek pro dosazování tekutého kovu do těla ingotu zcela eliminováno.

obr. 74 a 75 POROSITY (%) - strukturní nespojitost materiálu



Obr. 74: 8K8,4 - POROSITY (%)

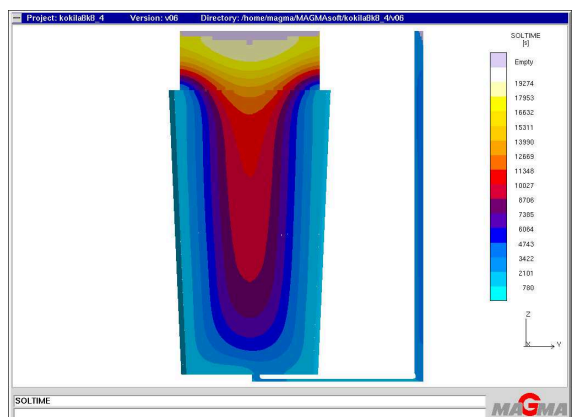


Obr. 75: 8K9,2 - POROSITY (%)

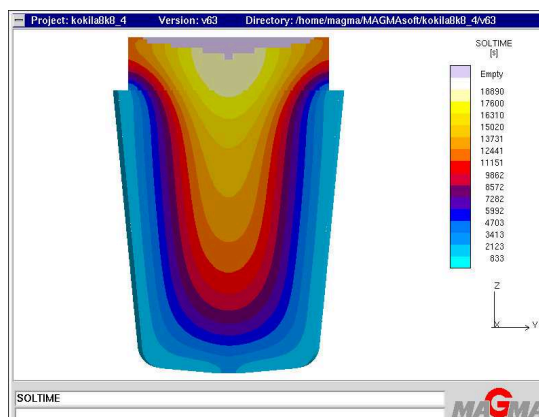
Pravděpodobnost výskytu nespojitostí materiálu POROSITY [%] zobrazuje inverzně hodnoty procentuálního vyjádření homogenní fáze Feeding [%].

Nespojitosti materiálu v praxi odpovídají vadám typu staženin, ředin a dutin. Je zřejmá pravděpodobnost výskytu nespojitostí v hlavě ingotu a místech posledního tuhnutí, spojených s tvorbou primární staženiny. Tělo ingotu není podle uvedeného kritéria zasaženo vadami.

obr. 76 a 77 SOLTIME (s) - průběh pásma teploty solidu v závislosti na čase



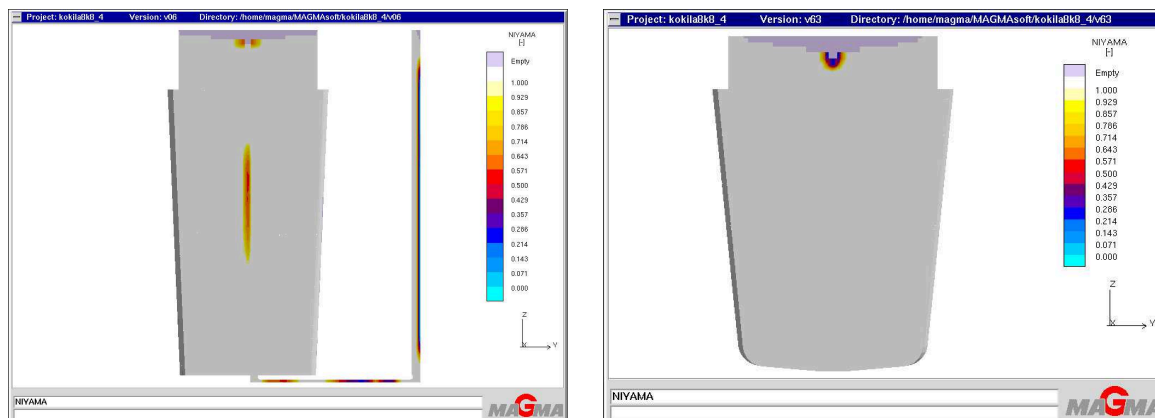
Obr. 76: 8K8,4 - SOLTIME (s)



Obr. 77: 8K9,2 - SOLTIME (s)

Grafické vyjádření průběhu pásma teploty solidu SOLTIME [s] dokumentuje průběh tuhnutí ingotu v závislosti na čase v souladu s předchozími závěry. Ingot 8K9,2 prokazuje lepší průběh izotermických křivek, které bezpečně umožňují průběh usměrněného tuhnutí.

obr. 78 a 79 NIYAMA (1) škála 0 až 1 - kritérium pro vznik mikrostaženin

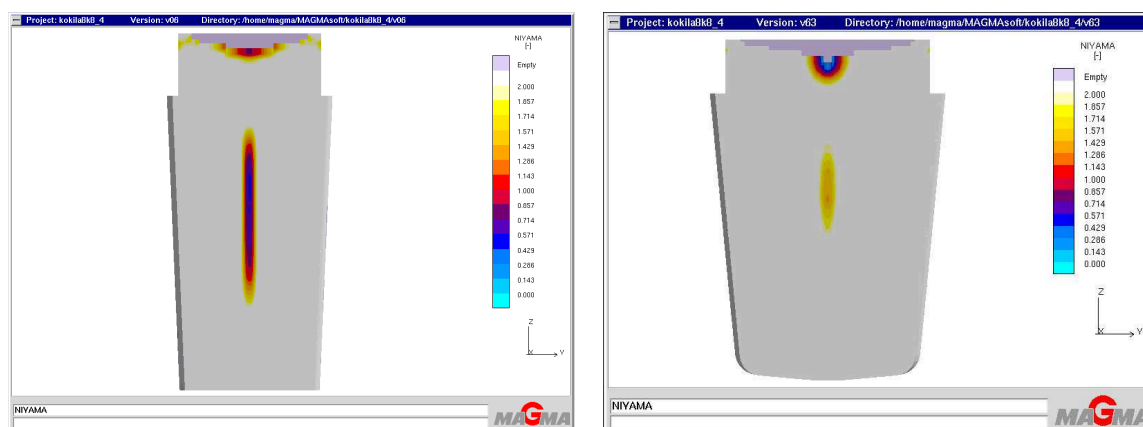


Obr. 78: 8K8,4 - NIYAMA (1) škála 0 až 1 Obr. 79: 8K9,2 - NIYAMA (1) škála 0 až 1

Podélný osový řez tělem ingotu v zobrazení Niyamova kritéria zobrazuje riziková místa pro vznik mikrostaženin. Platnost kritické hodnoty Niyamaova kritéria (0,775) byla ověřena pouze pro ocelové odlitky. Pro podmínky ocelových ingotů dané kritérium a stanovení kritické hodnoty bude nezbytné upřesnit.

Z obrázku je při zobrazení Niyamova kritéria ve škále (0÷1) v osové části ingotu 8K8,4 patrné pásmo s hodnotami G/\sqrt{T} až $0,50 \text{ K}^{1/2} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{mm}^{-1}$. Je zřejmé, že v ose ingotu v oblasti zasahující cca 30 % výšky těla může docházet ke vzniku ředin, dutin a s nimi souvisejících vad ingotu, přičemž v případě ingotu 8K9,2 je uvedená vada téměř eliminována.

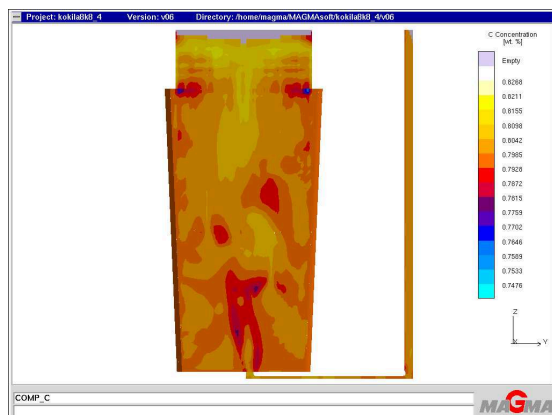
obr. 80 a 81 NIYAMA (1) škála 0 až 2 - kritérium pro vznik mikrostaženin



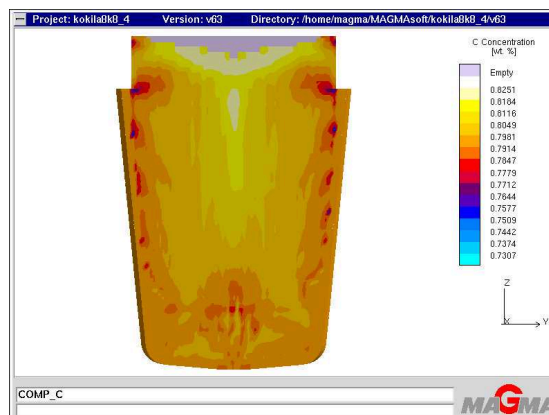
Obr. 80: 8K8,4 - NIYAMA (1) škála 0 až 2 Obr. 81: 8K9,2 - NIYAMA (1) škála 0 až 2

Z obrázků je v návaznosti na předchozí obr. 78 a obr. 79 při zobrazení Niyamova kriteriia ve škále (0÷2) zřejmý přímý vliv tvaru kokily na rozsah vad.

obr. 82 a 83 Segregation - koncentrace C



Obr. 82: 8K8,4 - Segregation C



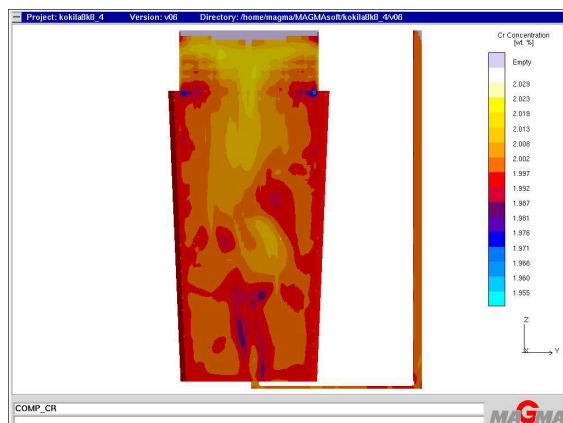
Obr. 83: 8K9,2 - Segregation C

Změna koncentrace uhlíku po průřezu ingotu je významně závislá na čase tuhnutí a největších hodnotách odmíšení, popř. segregací. Ty jsou pak v těle ingotu zřejmé v části pod hlavou ingotu.

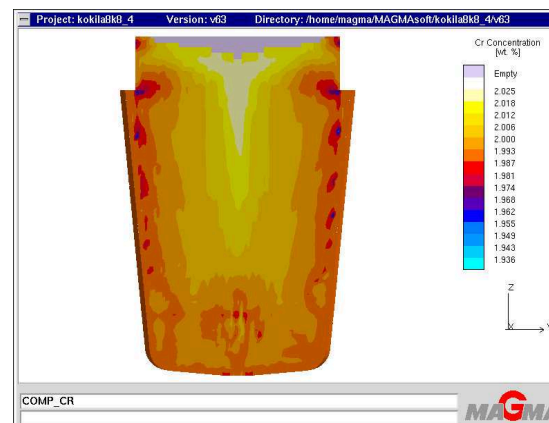
Ingot 8K9,2 vykazuje zřejmý sklon k tvorbě pásem segregací a rozsah zasažení těla ingotu bude v praxi zřejmě závislý zejména na způsobu ošetření hlavy ingotu. Segregace ingotu však podle výsledků numerické simulace představuje pouze změnu uhlíku v rozpětí cca 0,08%hm. C, což nepředstavuje odchylky větší než $\pm 0,04\%$ hm. C, tedy zhruba 5% rozptyl koncentrace od střední hodnoty obsahu uhlíku v primární tavenině. Takové riziko je z hlediska povolených normovaných odchylek chemického složení zcela přijatelné.

obr. 84 až 89 Segregation - koncentrace Cr, Mo, Mn

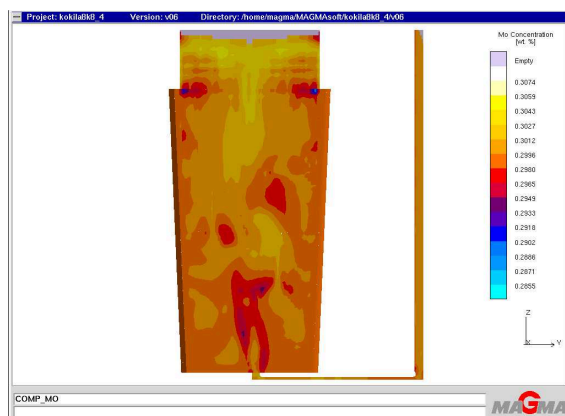
Obdobné závěry jako pro uhlík platí i pro chrom, molybden a mangan.



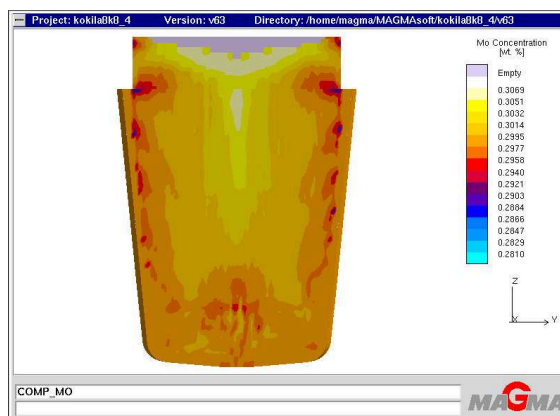
Obr. 84: 8K8,4 - Segregation Cr



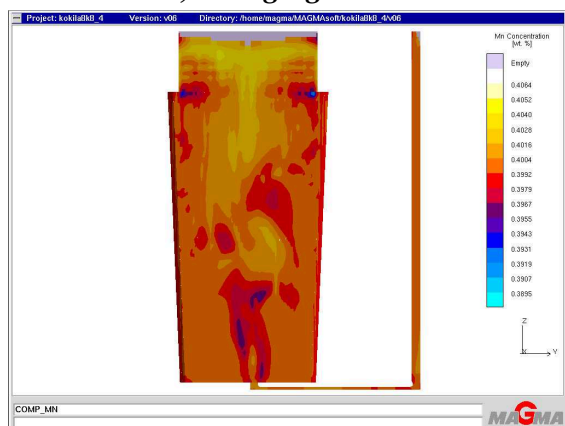
Obr. 85: 8K9,2 - Segregation Cr



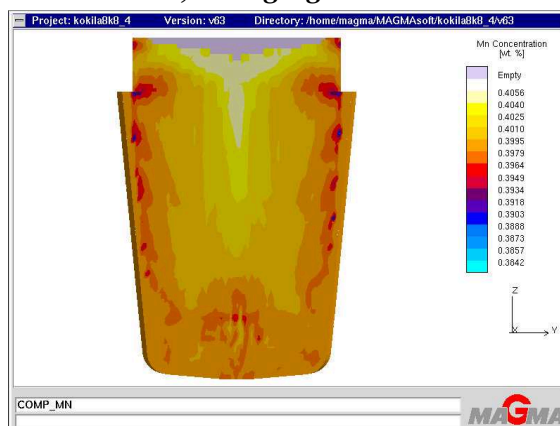
Obr. 86: 8K8,4 - Segregation Mo



Obr. 87: 8K9,2 - Segregation Mo



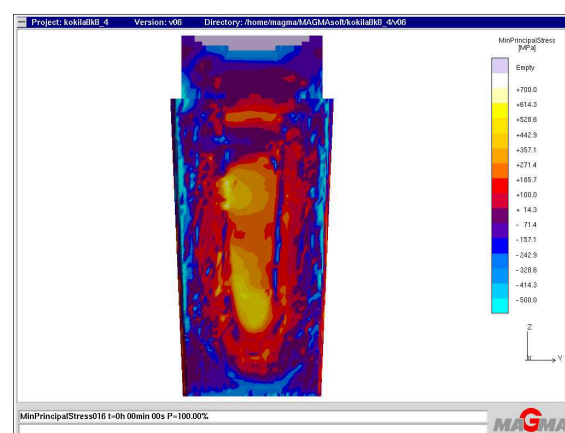
Obr. 88: 8K8,4 - Segregation Mn



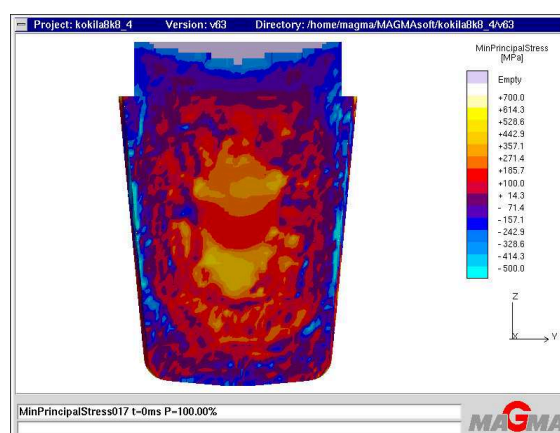
Obr. 89: 8K9,2 - Segregation Mn

obr. 90 a 91 MaxPrincipalStres (MPa) - poměrný lokální tlak

Obrázky zobrazují poměrná lokální tlaková napětí v příčných řezech tělem ingotu v důsledku objemových změn v průběhu tuhnutí ocelového ingotu.



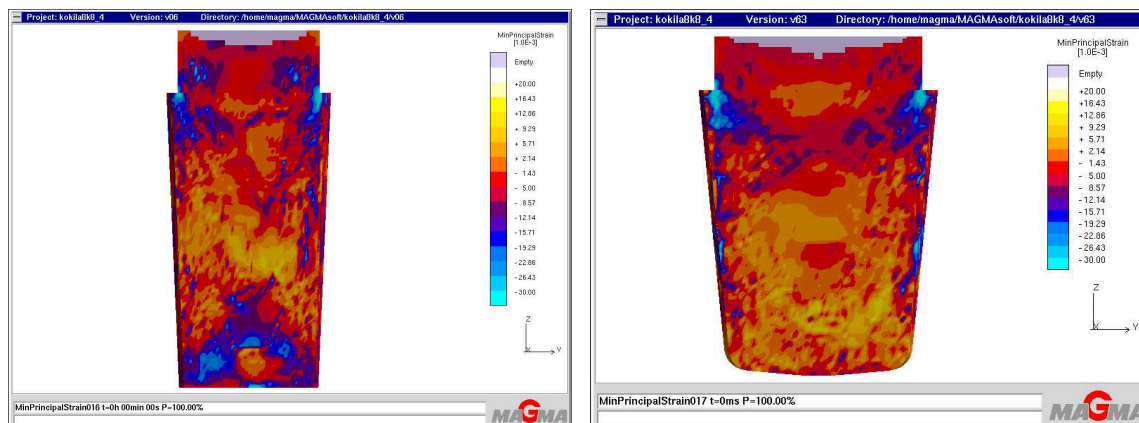
Obr. 90: 8K8,4 – MaxPrinc.Stres (MPa)



Obr. 91: 8K9,2 – MaxPrinc.Stres (MPa)

Z obrázků je zřejmé zasažení střední části těla ingotu 8K8,4 pásmem relativně vysokého lokálního napětí. Relativně nižší napětí a rovnoměrnější rozložení napětí po průřezu ingotu se projevuje u varianty ingotu 8K9,2.

obr. 92 a 93 MaxPrincipalStrain (MPa) - poměrné lokální napětí

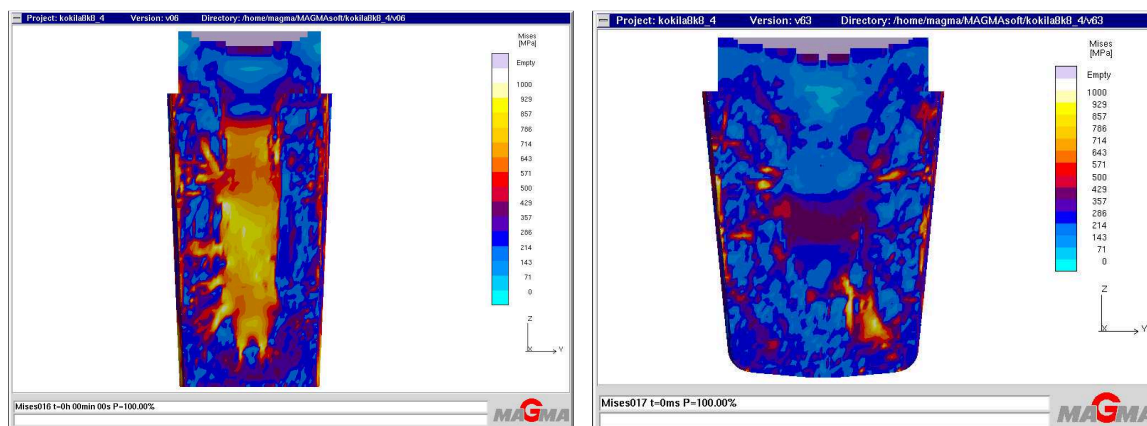


Obr. 92: 8K8,4 – MaxPrinc.Strain (MPa) Obr. 93: 8K9,2 – MaxPrinc.Strain (MPa)

Obrázky dokumentují výsledná poměrná lokální tahová napětí v příčných řezech tělem ingotu v důsledku objemových změn v průběhu tuhnutí ocelového ingotu.

Z obrázků jsou patrné významné rozdíly po průřezu ingotů. Srovnatelná napětí ovšem s rovnoměrnějším rozložením po průřezu ingotu jsou zřejmá u ingotu 8K9,2.

obr. 94 a 95 Mises (MPa) - porovnávací napětí



Obr. 94: 8K8,4 - Mises (MPa)

Obr. 95: 8K9,2 - Mises (MPa)

Relativní napětí, jak již bylo uvedeno v kap. 4.6, s jehož pomocí lze porovnávat trojosý napětíový stav s jednoosým napětíovým stavem (trhací zkouškou), tzn. že výsledky napětí Mises můžeme přímo porovnat s výsledky meze kluzu a pevnosti při měření vlastností materiálu zkouškou tahem.

Hodnoty relativního napětí mají přímou souvislost s předchozí charakteristikou poměrného lokálního napětí $MaxPrincipalStres$ a potvrzují snížení napětí v ingotu 8K9,2 vlivem tuhnutí taveniny v podmínkách nového varu kokily.

6. ZHODNOCENÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ

Provedené simulace dokumentují v několika základních charakteristikách dosaženou kvalitu ingotu. Za podstatné měřítko pro uvažování změn v technologii výroby ingotů a klíčové z hlediska hodnocení dosažené kvality ingotu lze uvažovat parametr NIYAMA KRITERIUM, jehož výsledné hodnoty z numerických výpočtů v kritických místech výskytu vad výkovků značně převyšují povolenou úroveň 0,775 platnou pro simulace a hodnocení kvality ocelových odlitků.

V rámci dizertační práce byly provedeny následující kroky:

- ✓ ověření podmínek odlévání a tuhnutí ingotu z nástrojové oceli GS80Cr
- ✓ ověření podmínek odlévání a tuhnutí ingotu z nástrojové oceli X40CrMoV51
- ✓ výběr kritického parametru pro vývoj nového tvaru kokily
- ✓ simulace lití a tuhnutí 61 variant modifikací tvaru kokily 8K8,4
- ✓ výběr optimálního tvaru modifikace ingotu 8K8,4 pro realizaci
- ✓ simulace lití a tuhnutí výsledné varianty návrhu tvaru kokily 8K9,2.

Zásadní změnu tvaru kokily lze definovat především jako:

- změnu poměru H/D

původní	H/D = 1,99	pro ingot 8K8,4
současný	H/D = 1.33	pro ingot 8K9,2
- změnu úkosu

původní	$\alpha = 2,1^\circ$	pro ingot 8K8,4
současný	$\alpha = 5.7^\circ$	pro ingot 8K9,2
- konstrukční úpravu tvaru kokily ve smyslu zvýšení využití těla ingotu

Uzavření patní části kokily umožňuje odlévání ingotů bez znečištění patní části cizím materiálem a tím dovoluje jejich vyšší využití.

Výsledky numerické simulace lití oceli a tuhnutí ingotu v kokile 8K9,2 dokumentují, proti původnímu ingotu 8K8,4, významné snížení rizika výskytu vad definované kriteriem Niyama.

Negativní vliv změny geometrie kokily 8K9,2 se projevil zejména ve smyslu chemické homogenity ingotu. Změna tvaru a prodloužení doby tuhnutí ingotu se znatelně projevila v pásmovém rozložení segregací.

Zlepšení lze očekávat ve smyslu homogenního rozložení napěťových stavů ingotu typu 8K9,2 v porovnání s ingotem 8K8,4

Na základě výsledků numerické simulace jsem inicioval ve ŽĐAS, a.s. jednání technické rady, která ve spolupráci s výrobcem kokil Arcelor Mittal Ostrava, a.s. rozhodla o vypracování výkresové dokumentace a následné výrobě dvou kusů nového formátu kokil s označením 8K9,2 pro odlévání ingotů z nástrojových ocelí o hmotnosti cca 8,9 tuny.

7. VÝSLEDNÝ NÁVRH = NOVÝ TYP INGOTU

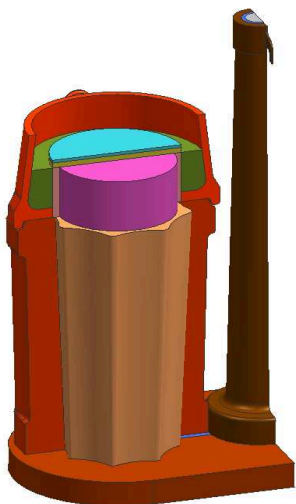
Návrh nového tvaru kokily byl proveden na základě výsledků numerické simulace v podmínkách softwaru MAGMASoft®. Výsledný návrh geometrie těla kokily označené 8K9,2 v porovnání s kokilou 8K8,4 uvádí tab.11. Výsledky shrnují průběžné zprávy z řešení projektu TANDEM FT-TA/061 a FR-TI1/222 [30 až 41].

Tab. 11: Geometrie původní kokily 8K8,4 a varianta návrhu nového tvaru kokily 8K9,2

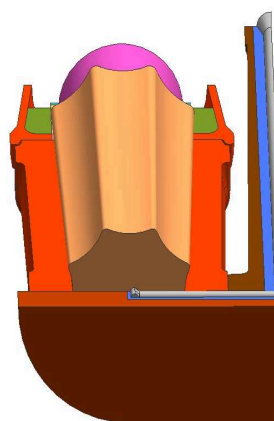
Typ ingotu	m	Rozměry kokily [mm]								Parametry kokily			
		patní			horní			D _s	výška H ₁	S	u	k	1/2 V
	[kg]	D _{P1}	D _{P2}	D _{PS}	D _{H1}	D _{H2}	D _{HS}			[t]	[%]	[%]	[°]
8K8,4	7600	842	709	776	974	820	897	836	1660	1.99	3.66	-7.3%	2.1
8K9.2	8 900	930	820	875	1208	1078	1143	1009	1340	1.33	10.00	-20.0%	5.7

7.1 Návrh těla nové kokily 8K9,2

V technickém řešení těla kokily 8K9,2 byla v porovnání s kokilou 8K8,4, provedena již zmíněná významná technická změna. Za účelem zvýšení čistoty paty ingotu a rovněž snížení rizika vzniku trhlin a prasklin na hranách ingotu bylo provedeno uzavření paty kokily s cílem zvýšení využití těla ingotu při následném zpracování volným kováním. Porovnání nového technického řešení kokily 8K9,2 s původním stavem kokily 8K8,4 dokumentují obr.96 až obr.99.



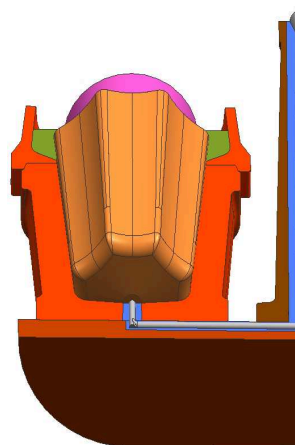
Obr. 96: 8K8,4 - stávající ingot + kokila



Obr. 97: 8K9,2 - stávající ingot + kokila



Obr. 98: 8K9,2 - nový ingot + kokila



Obr. 99: 8K9,2 - nový ingot + kokila

Na základě modelování procesu tuhnutí oceli softwarem MAGMASoft® byly tedy provedeny následující úpravy tvaru ingotu:

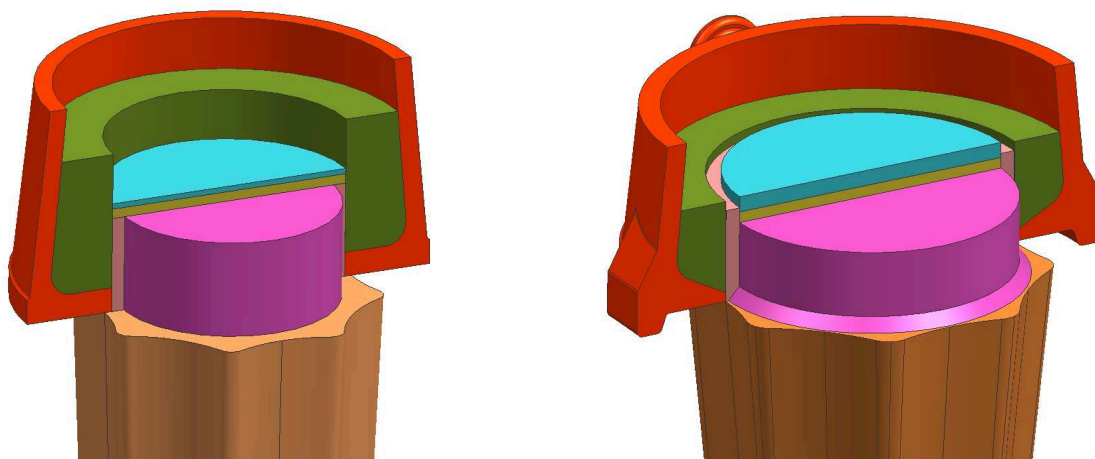
- změna poměru H/D (zvětšení průměru ingotu a snížení jeho výšky) z původní hodnoty 1.99 na 1.33
- zvětšení úkosu stěn ingotu z původní hodnoty 2.1° na 5.7°
- uzavření patní části ingotu

7.2 Návrh hlavy nové kokily 8K9,2

Pro novou kokilu 8K9,2 jsem také realizoval návrh nového hlavového nástavce pro ošetření hlavy ingotu při zajištění optimálních podmínek tuhnutí ingotu. Návrh tvaru hlavového nástavce vycházel rovněž z výsledků numerické simulace.

Při konstrukci geometrie hlavy ingotu byly uvažovány i výsledky praktických zkušeností, kdy bylo prokázáno, že u ingotů s velkým přesazením hlavy a těla kokily dochází ke vzniku staženin a dutin v těle ingotu v místě vzniku tíšin v části pod hlavou ingotu.

Porovnání nového technického řešení hlavy kokily 8K9,2 s původním stavem hlavy kokily 8K13,0 dokumentují obr.100 a obr.101.



Obr. 100: **8K13,0 ingot + původní hlava** **Obr. 101:** **8K9,2 ingot + nová hlava**

Řešení hlavy ingotu 8K9,2 v porovnání s původním stavem hlavy ingotu 8K13,0 na obr.100 a obr.101, mimo uvedené opatření zmenšení osazení na rozhraní hlava – tělo ingotu, zahrnovalo také částečné řešení problematiky nežádoucího odvodu tepla z části pod hlavou ingotu, jak je patrné z obr.100, způsobené stykem kovového pláště hlavy kokily s taveninou v těle ingotu.

8. STANOVENÍ ÚPRAV TECHNOLOGIE VÝROBY

V rámci realizace nového typu ingotu bylo provedeno zpracování návrhu technologie odlévání oceli do kokil 8K9,2.

8.1 Podmínky odlévání ingotu 8K9,2

Rychlost odlévání oceli do kokil 8K9,2 byla v souladu s optimálními podmínkami pro odlévání do kokil typu 8K8,4 stanovena dle tab. 12.

Tab. 12: Předpis lící rychlosti pro ingot 8K9,2

8K9.2	Hmotnost ingotu			Lící rychlost		Čas liti	
	tělo ingotu	hlava ingotu	celkem	tělo ingotu	hlava ingotu	tělo ingotu	hlava ingotu
	(kg)			(t . min ⁻¹)		(min : s)	
předpis	7 800	1 100	8 900	0.70	0.35	11:10	3:10

Po realizaci série taveb byly stanoveny reálné hodnoty pro lící rychlost ingotů 8K9,2. Upravený předpis lící rychlosti dokladuje tab. 13.

Tab. 13: Reálná lící rychlost pro ingot 8K9,2

8K9.2	Hmotnost ingotu			Lící rychlost		Čas liti	
	tělo ingotu	hlava ingotu	celkem	tělo ingotu	hlava ingotu	tělo ingotu	hlava ingotu
	(kg)			(t . min ⁻¹)		(min : s)	
skutečnost	7 800	1 100	8 900	0.62	0.55	12:30	2:00

Snížení lící rychlosti těla ingotu bylo nezbytné z důvodu vysoké rychlosti kovu při vstupu do kokily. Docházelo taktéž k neustálému odkrývání hladiny kovu v ose ingotu, kterému nezabránilo ani dávkování vyššího množství lícího prášku. Snímky na obr. 102 a obr. 103 dokumentují tento stav.



Obr. 102: *Případ 1 - „oko“ na hladině kovu v kokile*



Obr. 103: *Případ 2 - „oko“ na hladině kovu v kokile*

Zvýšení licí rychlosti v hlavě ingotu bylo naopak provedeno z důvodu velkého odvodu tepla z plochy hladiny kovu v kokile, které se projevovalo tvorbou zavalenin.

8.2 Izolační obklad pro kokilu 8K9,2

Pro ošetření hlavy ingotu prvních zkušebních taveb byl aplikován běžně ve ŽĐAS, a.s. používaný izolační obklad výšky 350mm a tloušťky 35mm – dodavatel KERKO, a.s. Košice (SK).

Účinnost izolačních obkladů se však projevila jako nedostatečná. Docházelo ke vzniku staženiny, jejíž kořen hraničil s tělem ingotu.

Snímky na obr. 104 a obr. 105 dokumentují výsledný vzhled hlavy ingotu 8K9,2 se staženinou po ošetření izolačním obkladem KERKO .



Obr. 104: *Primární staženina ingotu 8K9,2*



Obr. 105: *Detail – primární staženina*

Proto jsem v dalším kroku navázal spolupráci s českým výrobcem exotermických izolačních obkladů pro výrobu odlitků a ingotů, společností H.A.KOVOCHEM, spol. s r.o. se sídlem v Mníšku pod Brdy, kde proběhla další technická rada.

Jejím cílem bylo navrhnout a realizovat výrobu exotermického obkladu pro ingot 8K9,2, přičemž hlavní problematika výroby obkladu spočívala v jeho rozměrech - D1080x250x35mm se skosením.

Spolupráce na vývoji technologie ošetření hlavy ingotu 8K9,2 byla navázána rovněž s renomovaným výrobcem izolačních obkladů a exotermických směsí, společností FAPROSID, s.r.l. se sídlem v Itálii. Společnost nabídla pro ingot 8K9,2 ošetření hlavy ingotu pouze izolačním obkladem s rozměry odpovídajícími exotermickému obkladu H.A.KOVOCHEM, spol. s r.o., se zárukou vyhovující kvality ingotu.

Dalším krokem v řešení problematiky bylo posouzení vlivu izolačního obkladu a jakosti materiálu kokily. Byl realizován provozní experiment taveb TD9, TD10 a TD11, zahrnující ověření jednak účinnosti horní izolace hlavy ingotu a jednak rozdílu tepelné vodivosti kokil 8K9,2 z litiny GG nebo litiny GGG. Výsledky tohoto výzkumu nebyly zahrnuty do této dizertační práce.

9. OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ NA INGOTECH

9.1 Chemické složení ocelí

Pro experimentální práce byly vybrány jakosti oceli dle DIN17350 s označením X40CrMoV51, 90MnCrV8 a ocel POLDI 8CrMoSiV. [42, 43]

Výběr jakostí byl proveden na základě analýzy neshodné výroby nástrojových ocelí v letech 2000 až 2003, přičemž oceli typu X40CrMoV51 a 8Cr3MoSiV, při zahrnutí obdobných typů ocelí: X38CrMoV51, X38CrMoV53, 86CrMoV7, 8CrMoSiV, 8Cr3MoV, představovaly v souhrnu podíl na celkové neshodné produkci nástrojových ocelí více než 60%

Ocel jakosti 90MnCrV8 byla vybrána jako porovnávací jakost zastupující skupinu nízkolegovaných ocelí s vysokým obsahem uhlíku. Chemické složení ocelí vybraných pro experimentální práce uvádí tab. 14.

Tab. 14: Normované předpisy chemické složení vybraných ocelí pro experimentální práce

	X40CrMoV51		8Cr3MoSiV		90MnCrV8	
	hm. %					
	min	max	min	max	min	max
C	0.37	0.43	0.78	0.85	0.85	0.95
Mn	0.30	0.50	0.30	0.40	1.90	2.10
Si	0.90	1.20	0.60	0.80	0.10	0.40
P	max	0.030	max	0.015	max	0.030
S	max	0.030	max	0.005	max	0.030
Cr	4.80	5.50	3.00	3.20	0.20	0.50
Ni	-		max	0.30	-	
Mo	1.20	1.50	0.50	0.60	-	
V	0.90	1.10	0.10	0.20	0.05	0.15
Al	max	0.020	-		-	
H	-		max	0.00017	-	

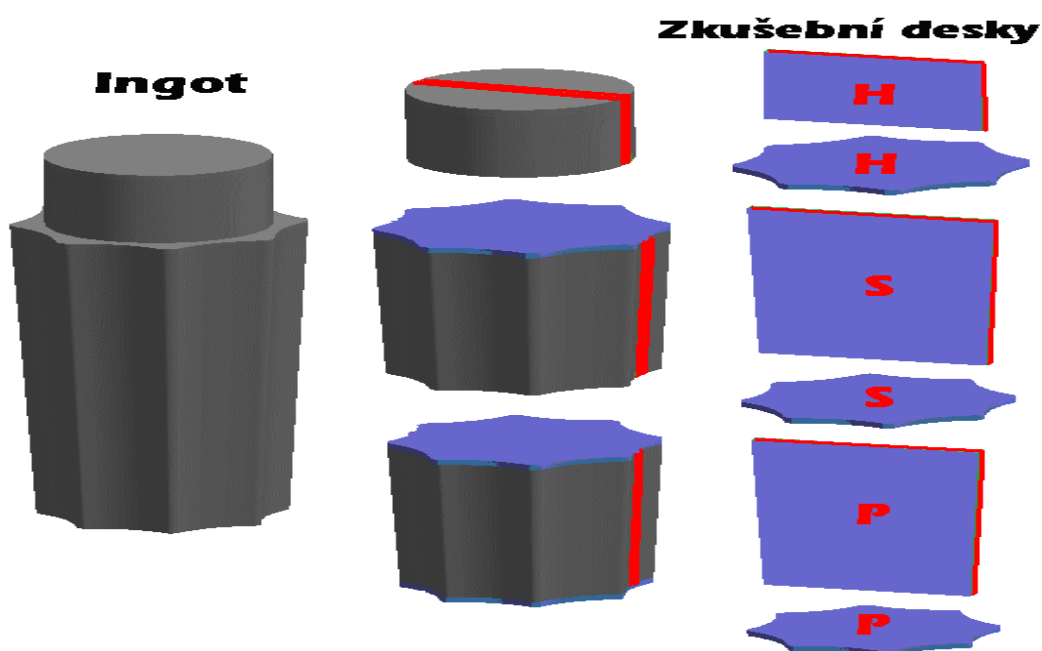
9.2 Struktura ingotu 8K8,4 vs. 8K9,2

V rámci provedených experimentálních taveb (TD1 až TD8) byly vyrobeny, tepelně zpracovány, rozřezány a analyzovány ingoty dle následující specifikace:

8K8,4 lito spodem	TD1	výroba EOP	jakost X40CrMoV51
8K8,4 lito spodem	TD2	výroba EOP - LF	jakost X40CrMoV51
8K8,4 lito spodem	TD3	výroba EOP – LF – VD	jakost X40CrMoV51
8K8,4 lito horem	TD4	výroba EOP – LF – VD	jakost X40CrMoV51
8K13.0 lito horem	TD4	výroba EOP – LF – VD	jakost X40CrMoV51
8K9,2 lito spodem	TD6	výroba EOP – LF – VD	jakost X40CrMoV51
8K9,2 lito spodem	TD7	výroba EOP – LF – VD	jakost 8Cr3MoSiV
8K9,2 lito spodem	TD8	výroba EOP – LF – VD	jakost 90MnCrV8

Cílem bylo ověření výsledku lití a tuhnutí ingotů experimentálních taveb z hlediska dosažené vnitřní jakosti ingotu.

Odlité a vychlazené ingoty byly před vlastním rozbořem jakosti rozděleny strojním řezáním na tři části značené: H – hlava ingotu, S – střední část ingotu a P – patní část ingotu, z nichž byly následně vyřezány zkušební desky. Schematicky je postup dělení ingotu znázorněn na obr. 106.



Obr. 106: Schéma dělení ingotů experimentálních taveb EU1, EU2, EU3

Pro dokumentaci výskytu strukturních vad odlitých ingotů, tj. především trhlin a dutin byly zvoleny metody:

- ☐ Kapilární zkouška – penetrační metoda.
- ☐ Hodnocení makrostruktury oceli hlubokým leptáním dle ČSN 42 0467.

9.3 Kapilární zkoušky

Plochy výřezů z ingotů byly podrobeny kapilární zkoušce penetrační metodou. Výsledky zkoušek dokumentují zprávy [44], [45].

Dokumentaci výsledků lze komentovat následovně:

8K8,4	lito spodem	TD1	výroba EOP	jakost X40CrMoV51
--------------	--------------------	------------	-------------------	--------------------------

Ingot byl zasažen porezitou v osově části téměř v celé výšce těla ingotu. Rozsah vad rovnoměrně zasahoval osu ingotu v pásmu o průměru 20cm. Malá část pod hlavou ingotu a v patě ingotu byla bez vad. Trhlínky byly jemné a rovnoměrně rozložené.

Hlava ingotu nevykazovala významnější primární staženinu.

8K8,4	lito spodem	TD2	výroba EOP - LF	jakost X40CrMoV51
--------------	--------------------	------------	------------------------	--------------------------

Ingot byl zasažen porezitou v osově části téměř v celé výšce těla ingotu. Rozsah vad rovnoměrně zasahoval osu ingotu v pásmu o průměru 20cm. Malá část pod hlavou ingotu a v patě ingotu byla bez vad. Trhlínky byly jemné a rovnoměrně rozložené, přičemž výraznější trhlíny byly patrné v ose ve střední části těla ingotu.

Hlava ingotu nevykazovala významnější primární staženinu.

8K8,4	lito spodem	TD3	výroba EOP – LF - VD	jakost X40CrMoV51
--------------	--------------------	------------	-----------------------------	--------------------------

Ingot byl zasažen porezitou v osově části téměř v celé výšce těla ingotu. Rozsah vad zasahoval osu ingotu v pásmu o průměru 20cm. Malá část pod hlavou ingotu a v patě ingotu byla bez vad. Vady – trhlíny, dutiny v těle ingotu byly velmi výrazné v horní polovině ingotu. Dutiny dosahovaly šířky až 2 mm a souvisle na sebe navazovaly.

Hlava ingotu nevykazovala významnější primární staženinu.

8K8,4	lito horem	TD4	výroba EOP – LF - VD	jakost X40CrMoV51
--------------	-------------------	------------	-----------------------------	--------------------------

Ingot odlévaný horem byl zasažen porézností v osově části převážně v horních partiích těla ingotu. Vady zasahovaly osu ingotu v pásmu o průměru 10cm. Malá část pod hlavou ingotu byla bez vad. Patní část ingotu ve výšce $\frac{1}{4}$ délky těla ingotu nevykazovala vady.

Vady – trhlíny, dutiny v těle ingotu byly velmi výrazné a dosahovaly šířky až 2 mm a prakticky přecházely v souvislou trhlínu. Rozložení trhlín bylo v případě ingotu litého horem v porovnání s ingotem litým spodem odlišné, přičemž bylo možné konstatovat menší rozsah vad u ingotu litého horem. V $\frac{1}{2}$ výšky těla ingotu byla patrná masivní trhlina o šířce až 5mm souvisle v délce zhruba 30cm.

Hlava ingotu nevykazovala významnější primární staženinu. Povrchová vrstva ingotu vykazovala souvislé pásmo vad do hloubky zhruba 10mm. Příčina výskytu této vady souvisí s technologií odlévání horem.

8K13,0	lito horem	TD4	výroba EOP – LF - VD	jakost X40CrMoV51
---------------	-------------------	------------	-----------------------------	--------------------------

Ingot větší hmotnosti, odlévaný horem byl zasažen porézností v osově části ingotu převážně v horních partiích těla ingotu. Vady zasahovaly osu ingotu v pásmu o průměru 10cm. Malá část pod hlavou ingotu byla bez vad. Patní část ingotu ve výšce 1/3 délky těla ingotu nevykazovala prakticky žádné vady.

Vady – trhliny, dutiny v těle ingotu byly velmi výrazné a místně dosahovaly šířky až 5mm. Souvislá trhlina se větvila v několik dalších. Stejně jako v případě ingotu 8K8,4 litého horem se 1/2 výšky těla ingotu vyskytovala masivní rozvětvená trhlina o šířce až 5mm souvisle v délce zhruba 25cm.

Hlava ingotu vykazovala výraznou primární staženinu, zasahující tělo ingotu. Na příčném řezu byl zajímavý výskyt vad v oblasti těla pod hlavou ingotu doprovázený masivními dutinami - staženinami v oblasti směrem od pásma vad k povrchu ingotu. Příčina vzniku takových staženin je zřejmě způsobená špatným konstrukčním uspořádáním hlavový nástavec – kokila. Přesazení hlavového nástavce neumožňuje správnou funkci hlavy ingotu, zvyšuje ochlazení uzlu kokila hlava a brání dosazování tekutého kovu z hlavového nástavce do problematických míst v těle ingotu.

Povrchová vrstva ingotu také v tomto případě vykazovala souvislé pásmo vad do hloubky zhruba 10mm. Příčina výskytu této vady opět souvisí s technologií odlévání horem.

8K9,2	lito spodem	TD6	výroba EOP – LF - VD	jakost X40CrMoV51
--------------	--------------------	------------	-----------------------------	--------------------------

Ingot byl zasažen porezitou v osově části v horní polovině těla ingotu. Rozsah vad zasahoval osu ingotu v pásmu o průměru 30cm v délce představující 1/4 výšky těla ingotu. Část pod hlavou ingotu v délce představující 1/4 výšky těla ingotu a spodní polovina ingotu byla bez vad.

Vady – trhliny v těle ingotu byly velmi jemné a rovnoměrně rozptýlené. Maximální velikost souvislé trhliny nepřesahovala délku 10mm. Dutiny se nevyskytovaly. Rozložení vad bylo odlišné než u ingotu 8K8,4 a 8K13,0.

Hlava ingotu nevykazovala významnější primární staženinu.

8K9,2	lito spodem	TD7	výroba EOP – LF - VD	jakost 8Cr3MoSiV
--------------	--------------------	------------	-----------------------------	-------------------------

Ingot byl zasažen porezitou ve střední části mimo osu v horní polovině těla ingotu. Rozsah vad představoval prstencové pásmo s vnitřním průměrem (5 až 10)cm zasahující do

průměru 60cm v délce představující $\frac{1}{2}$ výšky těla ingotu. Část pod hlavou ingotu a spodní polovina ingotu v délce představující $\frac{1}{3}$ výšky těla ingotu byla bez vad.

Vady – trhliny v těle ingotu byly velmi jemné a rovnoměrně rozptýlené. Maximální velikost souvislé trhliny nepřesahovala délku 5mm. Dutiny se vyskytovaly ve velmi omezené míře a byly nesouvislé. Rozložení vad bylo odlišné než u ingotu 8K8,4 a 8K13.0.

Hlava ingotu nevykazovala významnější primární staženinu.

8K9,2	lito spodem	TD8	výroba EOP – LF - VD	jakost 90MnCrV8
--------------	--------------------	------------	-----------------------------	------------------------

Ingot nebyl prakticky zasažen porezitou a dá se konstatovat, že byl bez vad. V části pod hlavou bylo patrné velmi malé pásmo drobných trhlinek.

Hlava ingotu vykazovala primární staženinu, která by mohla v případě odlití nižší hlavy nebo zhoršených podmínek tuhnutí zasáhnout tělo ingotu.

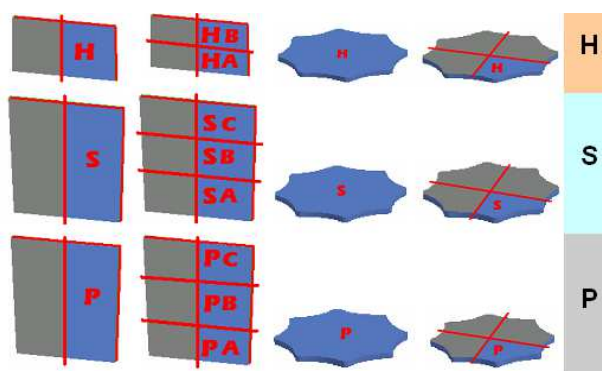
9.4 Hodnocení makrostruktury oceli hlubokým leptáním

Po provedení kapilárních zkoušek bylo provedeno hodnocení makrostruktury vzorků oceli taveb TD1, TD2, TD3 ingotu 8K8,4 a taveb TD6, TD7, TD8 ingotu 8K9,2 hlubokým leptáním dle ČSN 42 0467.

Kontrola makrostruktury hlubokým leptáním byla provedena za účelem potvrzení a doplnění výsledků získaných kapilární zkouškou.

Vzorky odebrané z ingotů byly strojním obráběním upraveny na drsnost povrchu vhodnou pro plánované zkoušky.

Na schéma obr. 107 je uvedeno barevné rozlišení analyzovaných ploch – modře a orientační značení vzorků z hlavové (H), středové (S) a patní (P) části ingotu.



Obr. 107: Barevné rozlišení analyzovaných ploch a značení vzorků

Provedení fáze přípravy vzorků, spojené s leptáním, bylo v případě výskytu velkého množství trhlin a dutin na povrchu zkoušeného materiálu provázeno se vzlínáním leptadla na povrch vzorků. Výsledky zkoušek bylo proto ve většině případů možné použít pro identifikaci pásma výskytu porézních oblastí ve vzorcích ingotů.

Tab. 15 uvádí souhrn výsledků hodnocení makrostruktury ingotů 8K8,4 a 8K9,2.

Tab. 15: Hodnocení makrostruktury ingotů 8K8,4 a 8K9,2

ingot	8K8.4			8K9.2		
jakost	X40CrMoV51			X40CrMoV51	8Cr3SiMoV	90MnCrV8
postup	EOP	EOP/LF	EOP/LF/VD	EOP	EOP/LF	EOP/LF/VD
příčné	TD1	TD2	TD3	TD6	TD7	TD8
H	Bez vad	Bez vad	Bez vad	Stupnice 1 Středová pórovitost st. č. 4	Bez vad	Stupnice 1 Středová pórovitost st. č. 5
S	Stupnice 2 Bodová ne stejnorodost st. č. 2	Stupnice 2 Bodová ne stejnorodost st. č. 2	Stupnice 2 Bodová ne stejnorodost st. č. 2	Stupnice 1 Středová pórovitost st. č. 5	Stupnice 1 Středová pórovitost st. č. 5	Stupnice 1 Středová pórovitost st. č. 5
P	Bez vad	Bez vad	Bez vad	Bez vad	Bez vad	Bez vad

I přes problematické vyhodnocení této zkoušky, vzhledem k rozsahu vad, bylo dosaženo výsledků, které poukazují na zřejmé snížení výskytu vad v ingotu 8K9,2 v porovnání s ingotem 8K8,4.

Souhrnný přehled výsledků zkoušek, formou fotodokumentace analyzovaných ploch uvádí [46], [47].

9.5 Chemická heterogenita ingotů

Vyhodnocení jakosti ingotů z hlediska chemického složení bylo provedeno s cílem dokumentovat vliv změny tvaru kokily, odlišných podmínek odlévání a tuhnutí ingotů na chemickou homogenitu resp. heterogenitu ingotů 8K8,4 a 8K9,2.

Práce obsahuje porovnání segregací resp. odmíšení vybraných prvků s významnou koncentrací v oceli nebo s nejvyššími koeficienty segregace.

9.5.1 Heterogenita ingotů jakosti X40CrMoV51 (TD1, TD2, TD3, TD6)

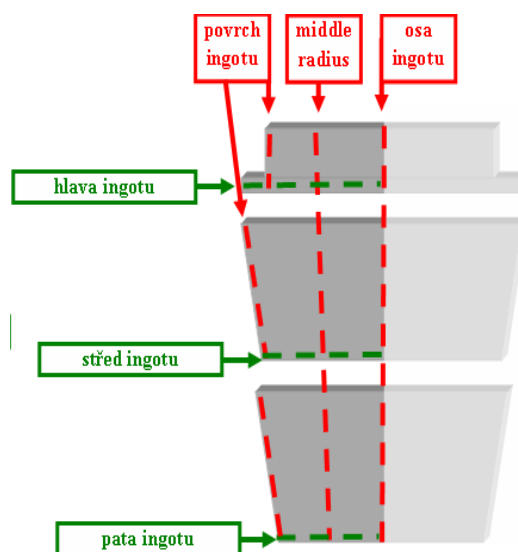
Výchozí stav pro hodnocení chemické heterogenity ingotu představuje konečná tavbová analýza oceli, stanovená na vzorku oceli odebraného z proudu oceli v průběhu odlévání ingotů.

Výsledky stanovení koncentrace základních legujících a doprovodných prvků u sledovaných taveb jakosti oceli X40CrMoV51 uvádí tab. 16.

Tab. 16: Chemické složení taveb TD1, TD2, TD3 a TD6

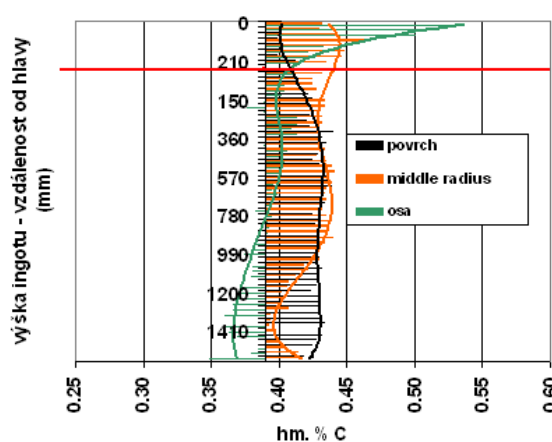
Prvek (%hm)				C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
Tavební analýza	8K8.4	EOP	TD1	0.38	0.38	0.92	0.017	0.007	4.80	0.13	1.22	0.92	0.008
		LF	TD2	0.39	0.40	0.96	0.016	0.005	4.85	0.18	1.25	0.95	0.014
		VD	TD3	0.38	0.35	0.98	0.016	0.002	4.90	0.15	1.28	0.96	0.019
	8K9.2	VD	TD6	0.37	0.35	0.96	0.023	0.001	4.95	0.23	1.25	0.92	0.018

Chemické složení po průřezu ingotu bylo stanoveno na vzorcích oceli odebraných v základních směrech a polohách v ingotu dle schéma na obr. 108.

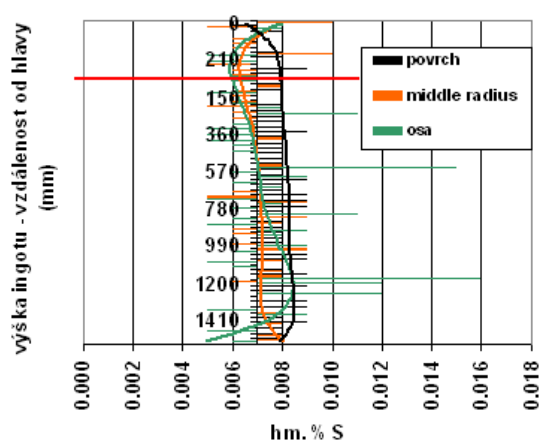


Obr. 108: Schéma směrů pro analýzu segregace prvků v ingotech 8K8,4 a 8K9,2

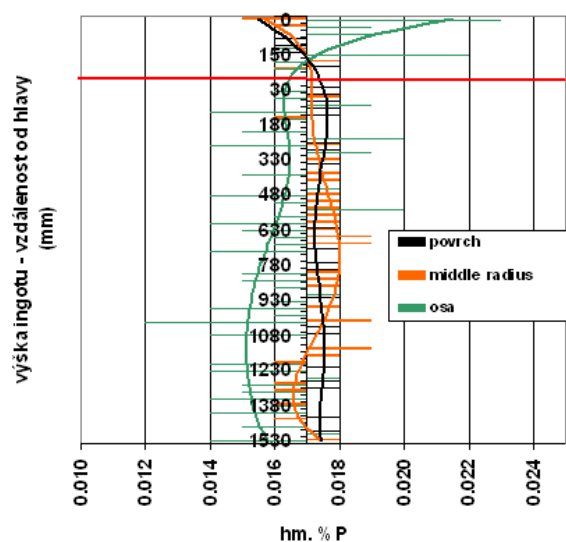
Změny koncentrace vybraných prvků v daných směrech po výšce ingotu 8K8,4 tavy TD1 dokumentují obr. 109 až 116. Hlava ingotu je vyznačena červeně.



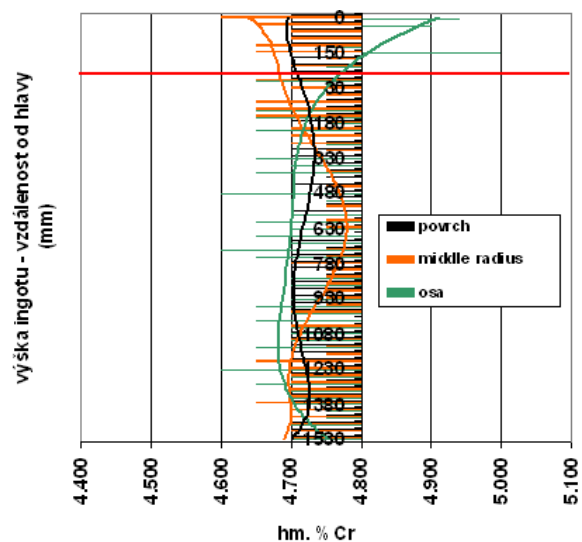
Obr. 109: TD1 - 8K8,4 - segregace - C



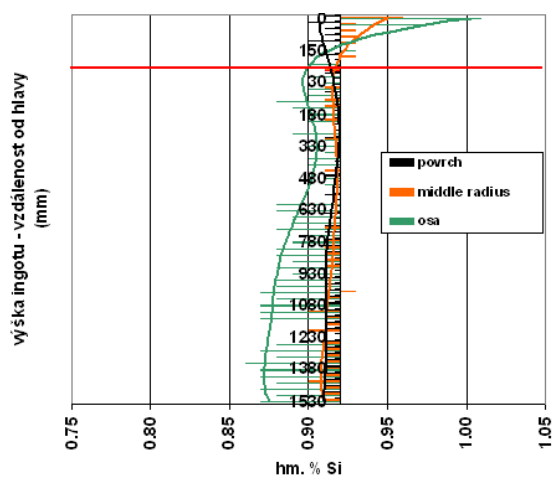
Obr. 110: TD1 - 8K8,4 - segregace - S



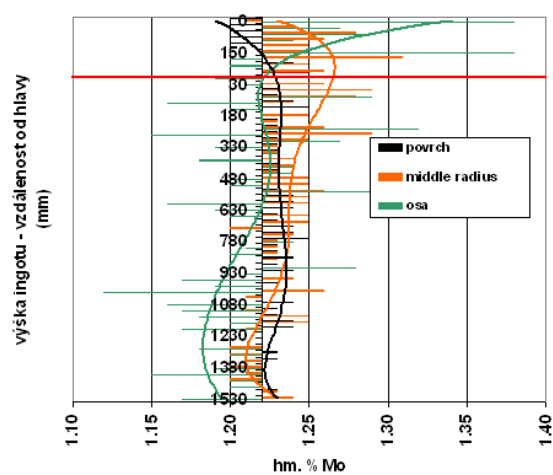
Obr. 111: TD1 - 8K8,4 - segregace - P



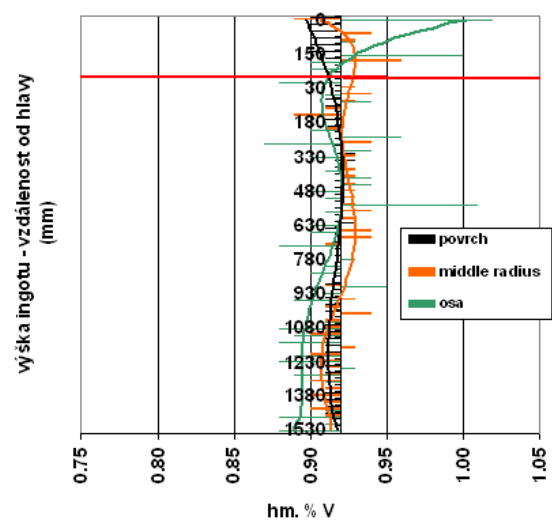
Obr. 112: TD1 - 8K8,4 - segregace - Cr



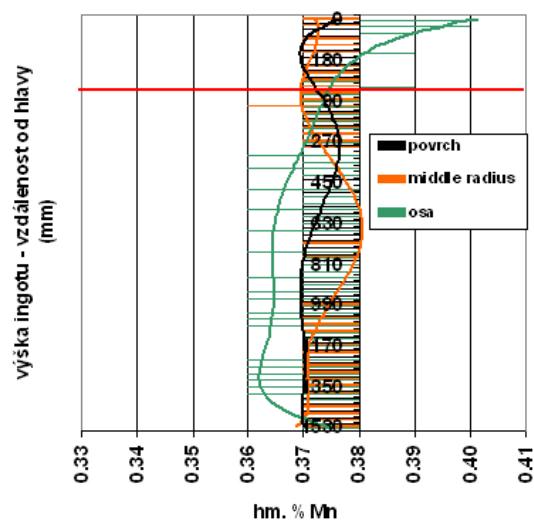
Obr. 113: TD1 - 8K8,4 - segregace Si



Obr. 114: TD1 - 8K8,4 - segregace - Mo



Obr. 115: TD1 - 8K8,4 - segregace - V

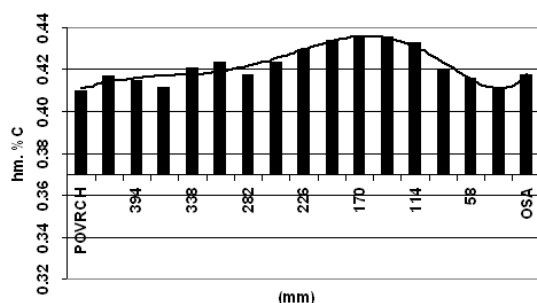


Obr. 116: TD1 - 8K8,4 - segregace - Mn

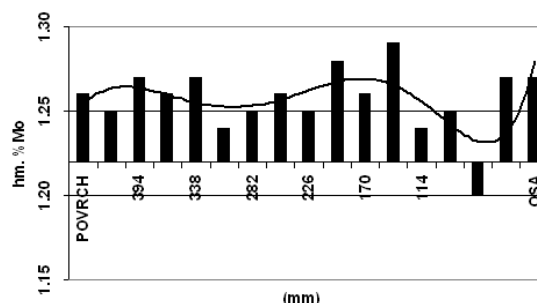
Z diagramů na obr. 109 až obr. 116 lze konstatovat, že maximální odmišení resp. segregace se projevuje v případě uhlíku, síry a molybdenu. Ostatní prvky neprokazují významné hodnoty odchylek od středního obsahu po výšce ingotu.

Pro hodnocení dalších ingotů z taveb TD1, TD2, TD3 a TD6 byly vybrány prvky uhlík a molybden. Vzhledem k obsahu síry v oceli zpracované technologií EOP/LF (TD2) nebo EOP/LF/VD (TD3, TD6), kde se vyskytuje v konečné zkoušce v koncentraci, která není z hlediska vlivu na užité vlastnosti oceli významná, resp. neočekává se segregace na úrovni, kdy by se významnou mohla stát, nebyla pro další hodnocení heterogenity uvažována.

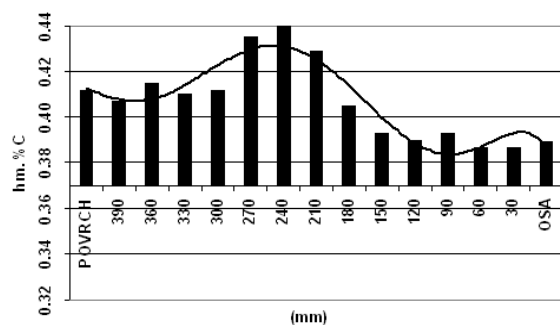
Hodnocení heterogenity koncentrace uhlíku a molybdenu v oceli ingotu 8K8,4 tavby TD1 v příčném směru, tedy po průřezu ingotu, dokumentují obr. 117 až 122.



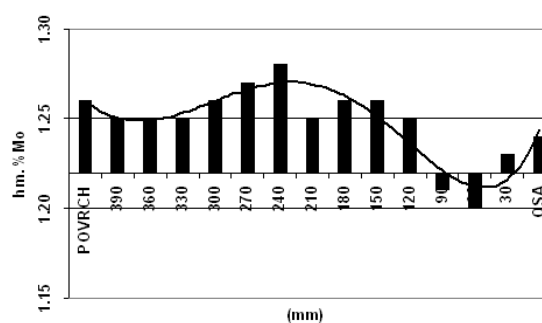
Obr. 117: TD1 - 8K8,4 - Hlava - C



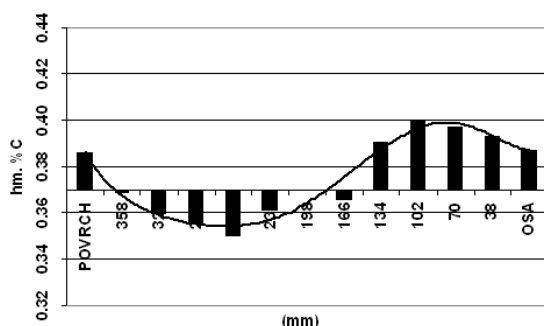
Obr. 118: TD1 - 8K8,4 - Hlava - Mo



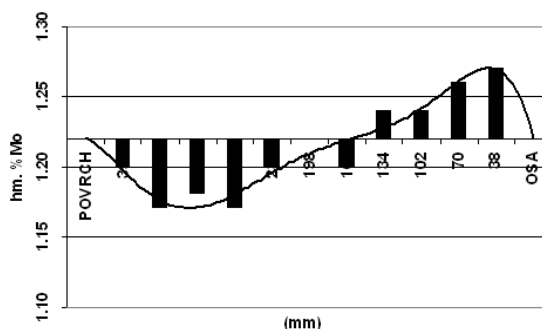
Obr. 119: TD1 - 8K8,4 - Střed - C



Obr. 120: TD1 - 8K8,4 - Střed - Mo



Obr. 121: TD1 - 8K8,4 - Pata C

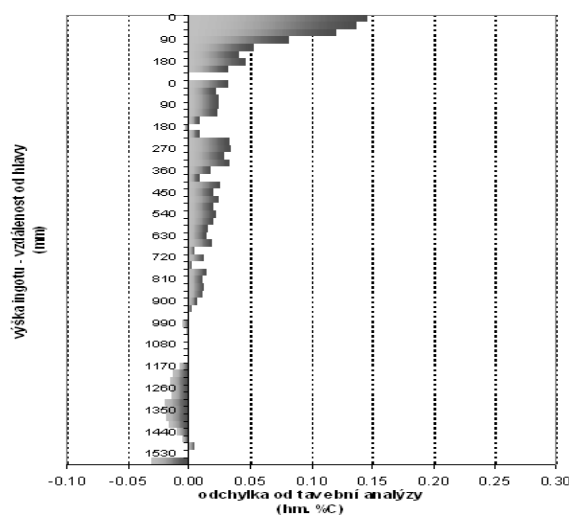


Obr. 122: TD1 - 8K8,4 - Pata - Mo

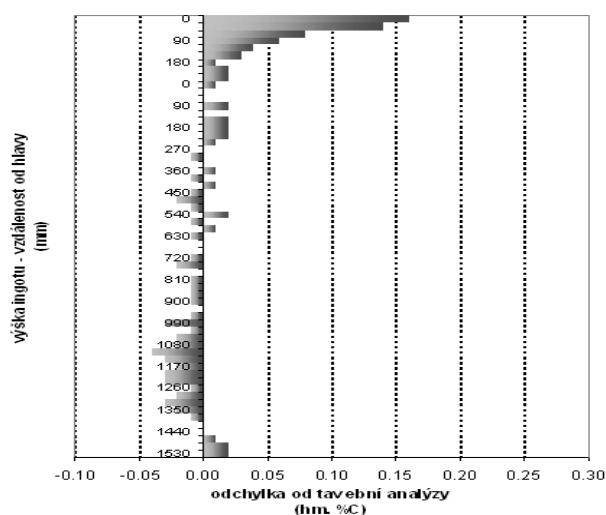
Vyhodnocení segregací resp. odmíšení uhlíku a molybdenu v příčném směru po průřezu ingotu neprokázalo výraznější odchylky od tavební analýzy. Lze konstatovat relativně homogenní rozložení obou prvků.

V další fázi hodnocení bylo přistoupeno k vzájemnému porovnání ingotů taveb TD1, TD2, TD3 a TD6 z hlediska segregací resp. odmíšení uhlíku. Pro porovnávací hodnocení byla zvolena osová část ingotu vykazující nejvyšší koncentrační změny a stupně segregace resp. odmíšení.

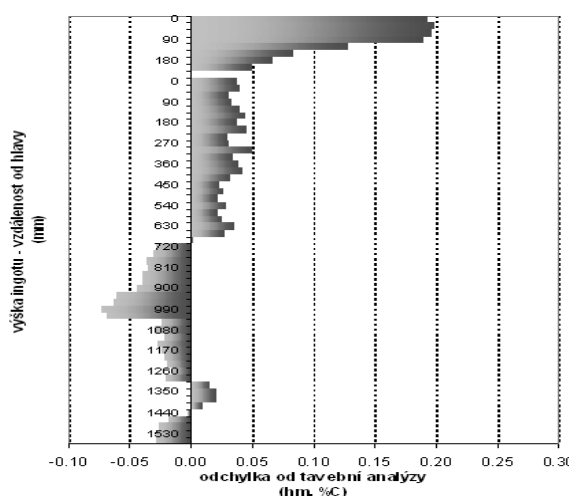
Diagramy pro vzájemné porovnání a hodnocení byly konstruovány na základě absolutních koncentračních odchylek od konečné tavbové analýzy. Segregace uhlíku v osově části taveb TD1, TD2, TD3 a TD6 uvádí obr. 123 až obr. 126.



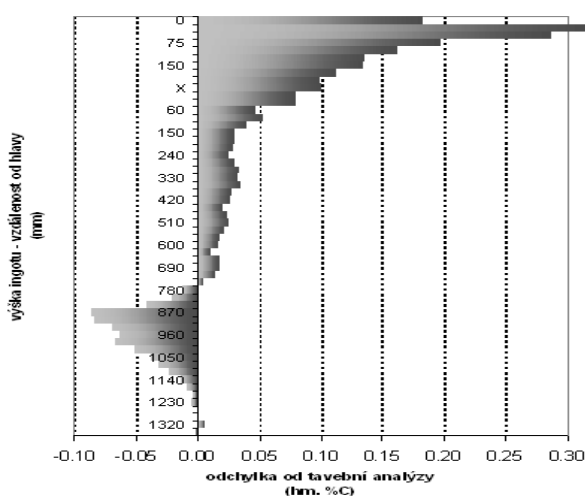
Obr. 123: TD1 - osa 8K8,4 - segregace C



Obr. 124: TD2 - osa 8K8,4 - segregace C



Obr. 125: TD3 - osa 8K8,4 - segregace C



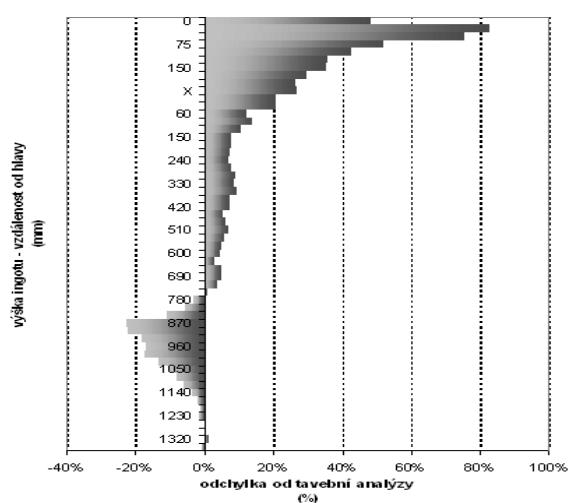
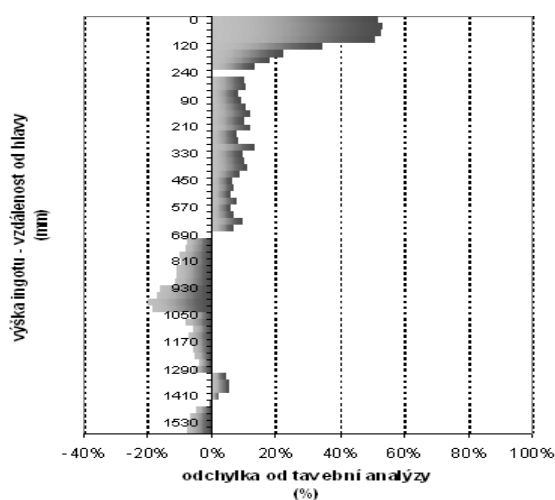
Obr. 126: TD6 - osa 8K9,2 - segregace C

Hlava ingotu je v grafech na vertikální ose vyznačena druhou nulou nebo křížkem. Porovnáním výsledků na obr. 123. až obr. 126 můžeme učinit následující konstatování:

Ve všech případech dochází v patní části ingotu k odmíšení uhlíku a v horní části ingotu naopak k segregaci. Porovnání ingotu 8K8,4 na obr. 123 až obr. 125 dokladuje srovnatelný stupeň heterogenity ingotů vyrobených technologií EOP (TD1) a EOP/LF (TD2). Výrazný nárůst odchylek je patrný v případě ingotu 8K8,4 odlitého z oceli vyrobené technologií EOP/LF/VD (TD3).

Porovnáním obr. 125 a obr. 126, tedy hodnocení ingotů 8K8,4 a 8K9,2 odlitých z oceli vyrobené technologií EOP/LF/VD potvrzuje vliv změny tvaru kokily na rozsah heterogenit. V dolních $\frac{2}{3}$ těla ingotu můžeme konstatovat srovnatelný stupeň heterogenity, přičemž segregace uhlíku významně narůstá směrem k hlavě v případě ingotu 8K9,2. K exponenciálnímu nárůstu koncentrace uhlíku v ose ingotu 8K9,2 dochází ve vzdálenosti 150mm od hlavy ingotu.

Procentuelní vyjádření odchylek obsahu uhlíku uvádí obr. 127 a obr. 128.



Obr. 127: TD3 - osa 8K8,4 - segregace C **Obr. 128:** TD6 - osa 8K9,2 - segregace C

Je třeba podotknout, že výška hlavy ingotu 8K8,4 v litém stavu představovala výšku kovu 350mm a v případě ingotu 8K9,2 výška hlavy ingotu po nalití byla 250mm. V tuhém stavu pak v ose výška hlavy ingotu 8K8,4 představuje rozměr 240mm a v případě ingotu 8K9,2 rozměr 200mm.

Souhrnný přehled výsledků analýz chemického složení ingotů uvádí [48], [49].

Další hodnocení heterogenity ingotů bylo zaměřeno na ingoty tavby TD7 a TD8.

9.5.2 Heterogenita ingotu jakosti 8Cr3SiMoV (TD7)

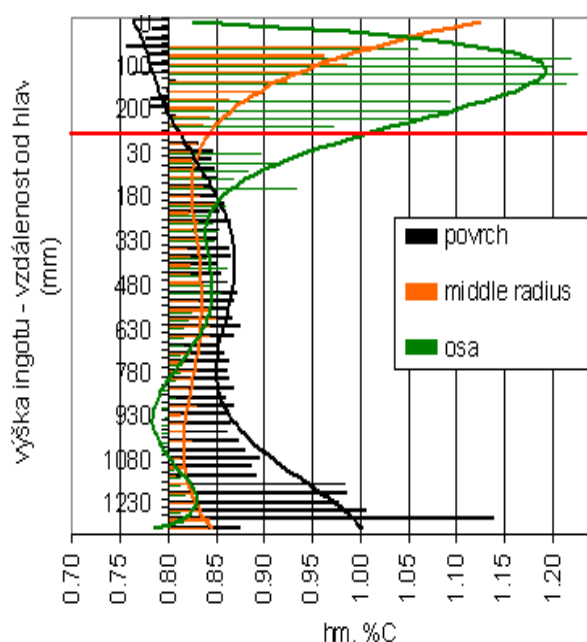
Koncentrace základních legujících a doprovodných prvků stanovené v konečné tavbové zkoušce, jako výchozí stav pro hodnocení chemické heterogenity ingotu 8K9,2 tavby TD7 jakosti oceli 8Cr3SiMoV uvádí tab. 15.

Tab. 17: Chemické složení tavby TD7

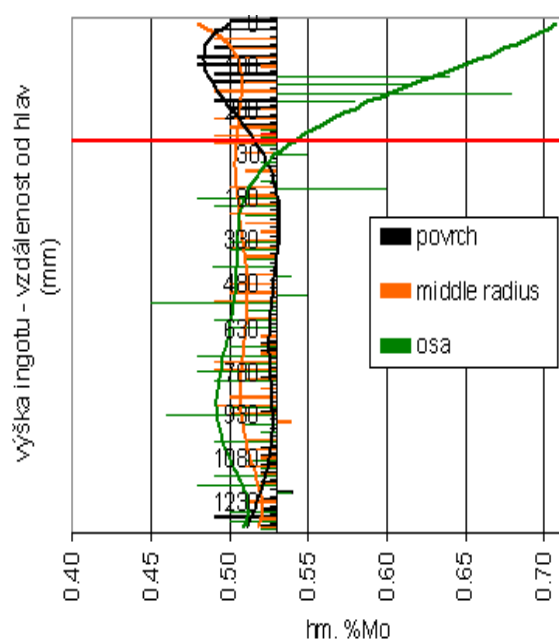
Prvek (%hm)				C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
Tavební analýza	8K9.2	VD	TD7	0.80	0.34	0.65	0.007	0.001	3.10	0.27	0.53	0.17	0.010

Chemické složení po průřezu ingotu bylo obdobně stanoveno na vzorcích oceli odebraných v základních směrech a polohách v ingotu dle schéma na obr. 108.

Změny koncentrace vybraných prvků, uhlíku a molybdenu, v daných směrech po výšce ingotu 8K9,2 tavby TD7 dokumentují obr. 129 a obr. 130. Hlava ingotu je vyznačena červeně.



Obr. 129: TD7 - 8K9,2 - segregace C



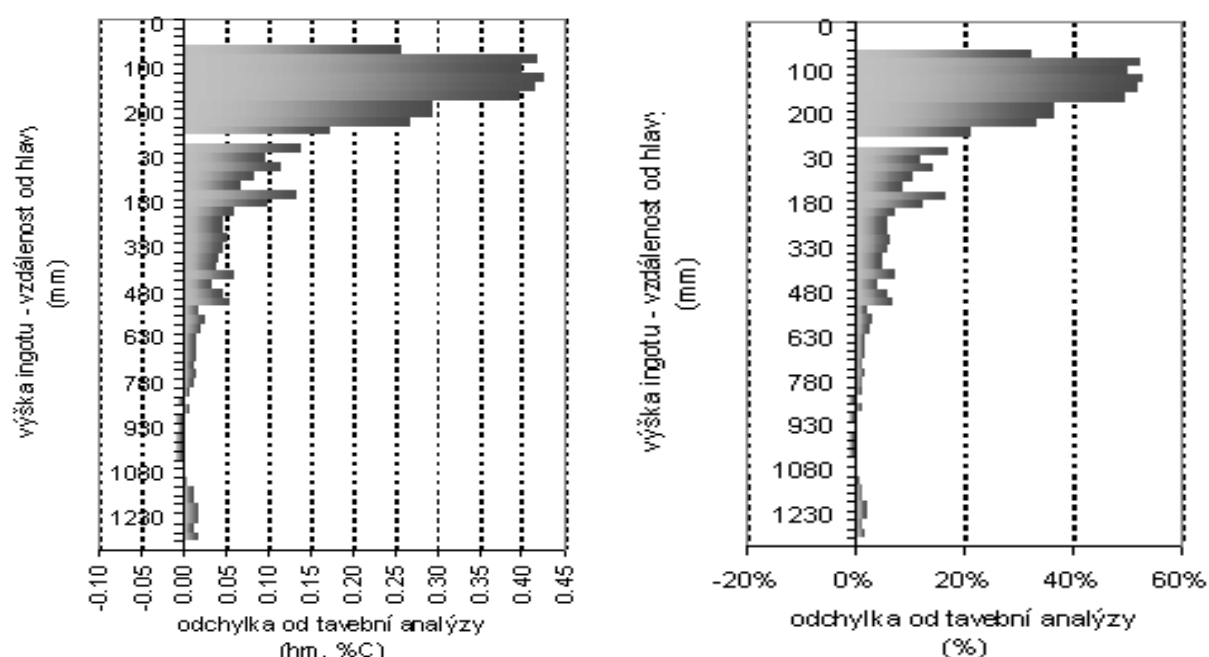
Obr. 130: TD7 - 8K9,2 - segregace - Mo

Z diagramů na obr. 129 a obr. 130 je zřejmé, že nejvýznamněji se odmišení resp. segregace v případě uhlíku a molybdenu projevuje v ose ingotu. Opět je patrné zasažení těla ingotu pásmem exponenciální změny koncentrace uhlíku projevujícím se ve vzdálenosti 180mm od hlavy ingotu.

Odchyly u koncentrace uhlíku na povrchu ingotu zřejmě souvisí s přechodem uhlíku při chemické reakci kovu s licím práškem PC2.1 (obsah 23hm.%C), aplikovaným v průběhu odlévání na hladinu kovu v kokile.

Koncentrace molybdenu je po výšce ingotu rovnoměrná, segregace se významně projevuje až v hlavě ingotu.

Diagram absolutních koncentračních odchylek a procentuelní vyjádření odchylek uhlíku od konečné tavbové analýzy uvádí obr. 131 a obr. 132.



Obr. 131: TD7 - osa 8K9,2 - segregace C **Obr. 132:** TD7 - osa 8K9,2 - segregace C

Hlava ingotu je v grafech na vertikální ose zřejmá ze vzdáleností a přerušením kontinuity dat v grafu.

Porovnáním výsledků na obr. 129. až obr. 132 můžeme konstatovat, že u ingotu 8K9,2 jakosti 8Cr3SiMoV dochází ve směru od patní části ingotu k rovnoměrné segregaci uhlíku.

K exponenciálnímu nárůstu koncentrace uhlíku v ose ingotu 8K9,2 dochází ve vzdálenosti 180mm od hlavy ingotu a změna koncentrace se blíží až 20%.

Souhrnný přehled výsledků analýz chemického složení ingotu TD7 uvádí [49].

9.5.3 Heterogenita ingotu jakosti 90MnCrV8 (TD8)

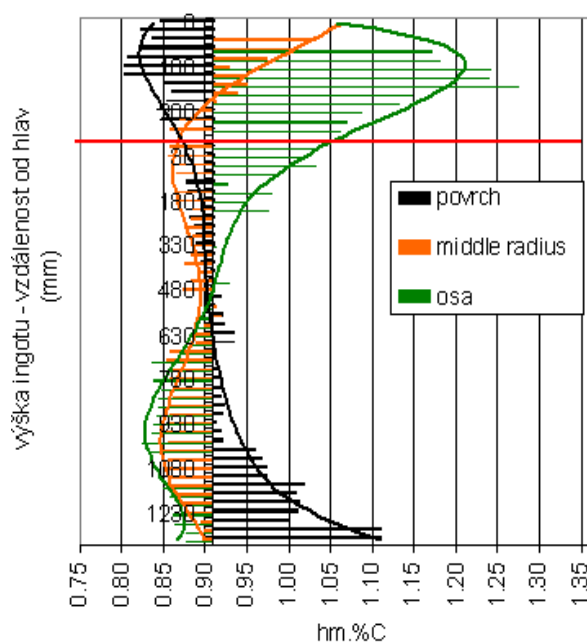
Koncentrace základních legujících a doprovodných prvků stanovené v konečné tavbové zkoušce, jako výchozí stav pro hodnocení chemické heterogenity ingotu 8K9,2 tavby TD8 jakosti oceli 90MnCrV8 uvádí tab. 16.

Tab. 18: Chemické složení tavby TD8

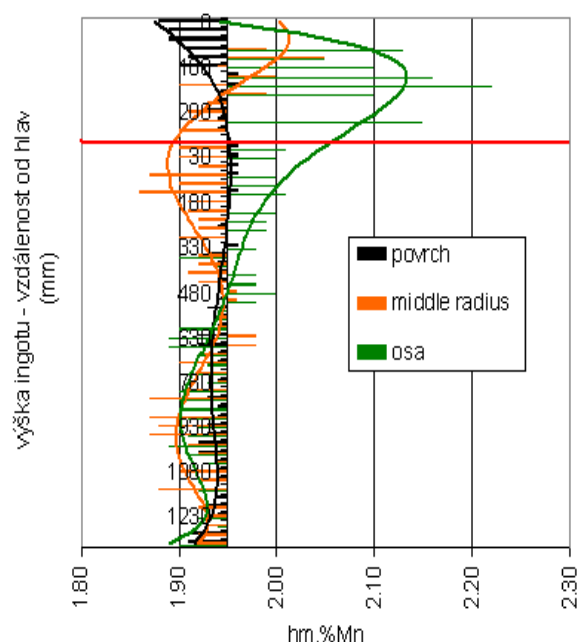
Prvek (%hm)				C	Mn	Si	P	S	Cr	V	Al
Tavební analýza	8K9.2	VD	TD8	0.89	1.95	0.15	0.023	0.003	0.25	0.07	0.010

Chemické složení po průřezu ingotu bylo obdobně stanoveno na vzorcích oceli odebraných v základních směrech a polohách v ingotu dle schéma na obr. 108

V případě oceli 90MnCrV8 byly změny koncentrace v daných směrech po výšce ingotu 8K9,2 tavby TD8 stanoveny pro uhlík a mangan. Výsledné koncentrační křivky dokumentují obr. 133 a obr. 134. Hlava ingotu je vyznačena červeně.



Obr. 133: TD8 - 8K9,2 - segregace C

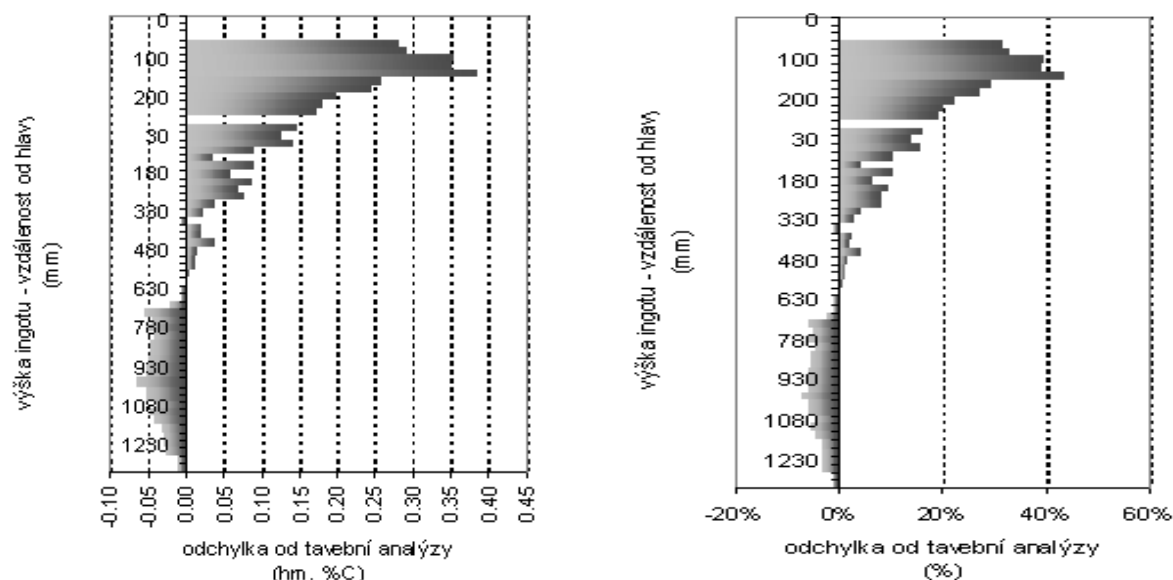


Obr. 134: TD8 - 8K9,2 - segregace Mn

Z diagramů na obr. 133 a 134 je zřejmé, že nejvýznamněji se odmíšení resp. segregace v případě uhlíku a manganu projevuje v ose ingotu. Opět je patrné zasažení těla ingotu pásmem exponenciální změny koncentrace uhlíku projevující se již od poloviny těla ingotu a přecházející do hlavy ingotu.

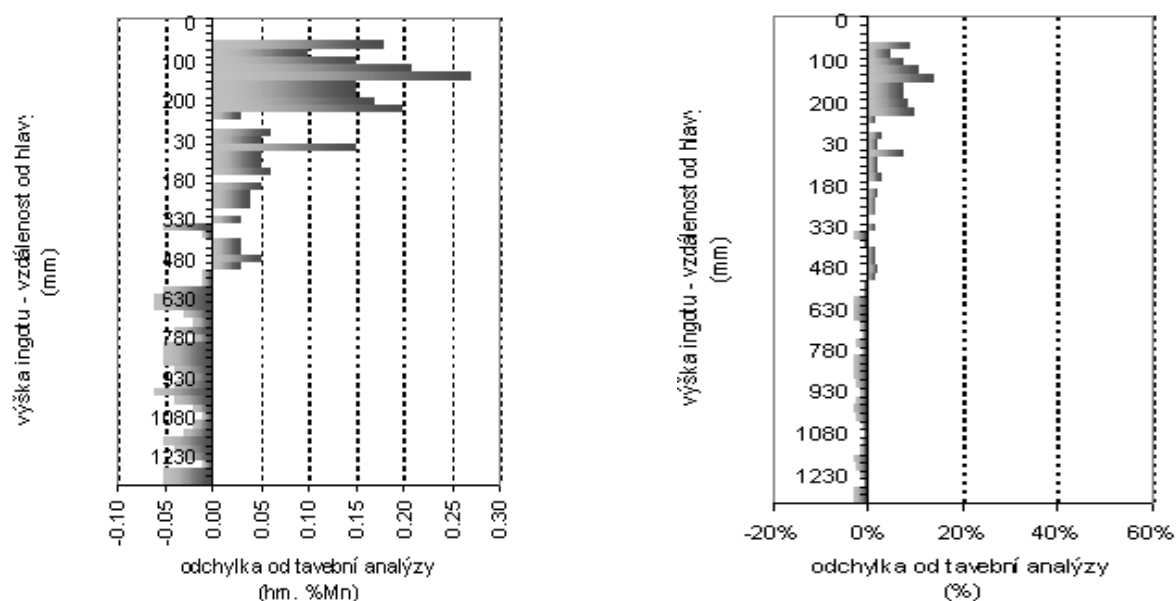
Koncentrace manganu je po výšce ingotu rovnoměrná a segregace se významně projevuje, obdobně jako v případě uhlíku exponenciální změnou koncentrace ve vzdálenosti asi 600mm od hlavy ingotu.

Diagram absolutních koncentračních odchylek a procentuelní vyjádření odchylek uhlíku od konečné tavbové analýzy uvádí obr. 135 a obr. 136.



Obr. 135: TD8 - osa 8K9,2 - segregace C **Obr. 136:** TD8 - osa 8K9,2 - segregace C

Diagram absolutních koncentračních odchylek a procentuelní vyjádření odchylek manganu od konečné tavbové analýzy uvádí obr. 137 a obr. 138.



Obr. 137: TD8 - osa 8K9,2 - segregace Mn **Obr. 138:** TD8 - osa 8K9,2 – segregace Mn

Hlava ingotu je v grafech na vertikální ose zřejmá ze vzdáleností a přerušením kontinuity dat v grafu.

Na základě porovnání výsledků na obr. 133 až obr. 138 lze konstatovat, že u ingotu 8K9,2 jakosti 90MnCrV8 dochází ve směru od patní části ingotu k odmíšení, které zhruba v $\frac{1}{2}$ výšky těla ingotu přechází v segregaci. Obdobný závěr lze učinit i pro případ manganu.

K exponenciálnímu nárůstu koncentrace uhlíku v ose ingotu 8K9,2 dochází již od bodu zvratu ve vzdálenosti 620mm od hlavy ingotu, což odpovídá $\frac{1}{2}$ výšky těla ingotu. a změna koncentrace se blíží až 20%.

Stanovíme-li maxima procentuelní koncentrační změny uhlíku a manganu v osově části po výšce těla ingotu, shledáváme hodnotu 7.7 % koncentrační změny manganu a pro koncentrační změny uhlíku hodnotou 16.4 %.

Souhrnný přehled výsledků analýz chemického složení ingotu TD8 uvádí [49].

9.6 Shrnutí výsledků hodnocení vnitřní jakosti ingotů

Provedené analýzy struktury a chemického složení experimentálních kusů ingotů 8K8,4 a 8K13.0 charakterizují a dokumentují původní stav výroby ingotů z nástrojových ocelí ve ŽDAS, a.s.

Jakost ingotů 8K8,4 a 8K13.0 odlévaných spodem nebo horem z nástrojové oceli X40CrMoV51 vyrobené technologií EOP, EOP/LF nebo EOP/LF/VD byla porovnána z hlediska struktury a chemické heterogenity s ingoty odlitými do kokily 8K9.2.

Trhliny, dutiny, mikrostaženiny, obecně vady, v případě ingotů 8K8,4 a 8K13.0 odlévaných spodem nebo horem zasahují vždy relativně velkou oblast osově části těla ingotu. Vady ingotů se projevují ve všech případech analyzovaných kusů, přičemž relativně horších výsledků bylo dosaženo u ingotu odlévaného spodem z oceli vyrobené technologií EOP/LF/VD.

Odléváním ingotů horem by bylo možné zabezpečit usměrněné tuhnutí ingotu, ovšem za cenu jednak zhoršené metalografické čistoty oceli vlivem sekundární oxidace kovu v průběhu odlévání a jednak velmi špatné povrchové kvality ingotu s následkem rizika vzniku povrchových trhlin v průběhu tváření a nezbytnosti zvýšení technologických přísad při

tváření pro následné opracování. Proto technologie odlévání ingotů nástrojových ocelí horem není vhodná.

Cílem hodnocení vnitřní jakosti experimentálně vyrobených ingotů bylo posoudit vliv změny tvaru kokily na zvýšení homogenity struktury ingotu a zamezení vzniku vad, které v podmínkách ŽĐAS, a.s není možné technologií tváření dále odstranit.

Všechny zkoušené ingoty 8K9.2 vykazovaly nižší zasažení osově části těla ingotu staženinami a ředinami, přičemž rozsah jejich škodlivosti byl snížen eliminací masivních trhlin nalezených v případě analýz struktury ingotů 8K8.4 a 8K13.0.

Provedené hodnocení makrostruktury vzorků oceli taveb TD1, TD2, TD3 ingotu 8K8.4 a taveb TD6, TD7, TD8 hlubokým leptáním dle ČSN 42 0467 potvrdilo zřejmou změnu trendu výskytu vady v ingotu 8K9.2 v porovnání s ingotem 8K8.4.

V rámci hodnocení chemické heterogenity ingotů X40CrMoV51 lze konstatovat maximální odmíšení resp. segregace po průřezu ingotu v případě uhlíku, síry a molybdenu. Ostatní prvky neprokazují významné hodnoty odchylek od středního obsahu. Porovnání ingotů 8K8.4 vyrobených technologií EOP a EOP/LF dokladuje srovnatelný stupeň heterogenity. Výrazný nárůst odchylek je patrný v případě ingotu 8K8.4 odlitého z oceli vyrobené technologií EOP/LF/VD.

Hodnocení ingotů 8K8.4 a 8K9.2 odlitých z oceli vyrobené technologií EOP/LF/VD potvrzuje vliv změny tvaru kokily na rozsah heterogenit. V dolních 2/3 výšky těla ingotu můžeme konstatovat srovnatelný stupeň heterogenity, přičemž segregace uhlíku významně narůstá směrem k hlavě v případě ingotu 8K9.2. K exponenciálnímu nárůstu koncentrace uhlíku v ose ingotu 8K9.2 dochází ve vzdálenosti 150mm od hlavy ingotu, přičemž výška hlavy ingotu 8K8.4 činí 350mm a v případě ingotu 8K9.2 pak 250mm.

Hodnocení heterogenity ingotu z oceli jakosti 8Cr3SiMoV dokladuje významné odmíšení resp. segregaci uhlíku a molybdenu v ose ingotu. Ve vzdálenosti 180mm od hlavy ingotu se projevuje pásmo exponenciálního nárůstu koncentrace uhlíku a změna koncentrace se blíží až 20%. Koncentrace molybdenu je po výšce ingotu rovnoměrná segregace se významně projevuje až v hlavě ingotu.

Pro ingot 8K9.2 z oceli jakosti 90MnCrV8 konstatujeme v ose ingotu významnou chemickou heterogenitu v případě uhlíku a manganu. Prvky ve spodní polovině ingotu vykazují odmíšení a v 1/2 výšky těla ingotu dochází k bodu zvratu, který se projevuje

exponenciální změnou koncentrace a výraznou segregací. Stanovíme-li maxima procentuelní koncentrační změny uhlíku a manganu v osově části po výšce těla ingotu, shledáváme hodnotu 7.7 % koncentrační změny manganu a pro koncentrační změny uhlíku hodnotou 16.4%.

10. OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ NA VÝKOVČÍCH

Výsledky numerického simulování lití a tuhnutí ocelového ingotu jakosti dle DIN17350 GS80Cr potvrzují riziko vzniku nehomogenní struktury v ose ingotu a poukazují v souladu s výsledky šetření výkovků jakosti 8CrMoSiV na místo výskytu vad ingotu. Uvedená tvrzení byla ověřena v praxi při odlévání uvedených jakostí v podmínkách ŽĐAS, a.s.

Z takto vyrobených ingotů z nástrojové oceli byly zhotoveny výkovky, u kterých byla sledována jejich vnitřní jakost zjišťovaná zkouškou ultrazvukem. Výsledky jsou pro roky 2000 – 2010 uvedeny v tab.19. V této tabulce je zřejmý pozitivní trend ve snižování zmetkovitosti od zavedení nového typu ingotu v roce 2006.

Tab. 19: Podíl neshodné výroby NO na výrobě oceli na výkovky v letech 2000 - 2010

Rok	Výroba oceli na výkovky			Neshodná výroba výkovků			
	Celkem	Podíl nástrojových ocelí na celkové výrobě oceli na výkovky		Celkem	Podíl nástrojových ocelí na neshodné výrobě výkovků		NO z celkové výroby
		t	%		t	%	
2000	18 739	4 279	22.8%	412.6	95.4	23%	0.51%
2001	26 654	3 760	14.1%	571.5	88.7	16%	0.33%
2002	22 233	3 341	15.0%	467.0	76.2	16%	0.34%
2003	22 659	2 560	11.3%	222.0	22.5	10%	0.10%
2004	27 769	3 053	11.0%	300.2	72.4	24%	0.26%
2005	30 517	2 119	6.9%	440.3	43.4	10%	0.14%
2006	33 405	1 682	5.0%	514.2	25.9	5%	0.08%
2007	31 920	2 159	6.8%	567.2	24.1	4%	0.08%
2008	31 895	2 392	7.5%	411.9	29.3	7%	0.09%
2009	18 726	1 568	8.4%	414.7	23.1	6%	0.12%
2010	22 657	2 460	10.9%	315.6	18.3	5.8%	0.08%

Podíl neshodné výroby výkovků z nástrojových ocelí, se z hlediska celkové hmotnosti neshodných výrobků v letech 2000 až 2005 pohyboval v rozpětí 10 až 24 %. Po zavedení nového typu kokily v roce 2006 klesl podíl zmetků z NO na neshodné výrobě výkovků na 5 až 7 %.

Na celkové produkci oceli na výkovky měly neshodné výkovky z nástrojových ocelí v období 2000 až 2005 podíl v rozpětí 0,10 až 0,51%. Po zavedení nového typu kokily klesl tento podíl na 0,08 až 0,12%.

Tab.20 dokumentuje, v období let 2000 - 2010, trend vývoje objemu výroby nástrojových ocelí, výskyt případů nevyhovujících výkovků a vývoj podílu neshodných výkovků na celkové produkci nástrojových ocelí v podmínkách ŽĐAS, a.s.

Tab. 20: Trend vývoje výroby nástrojových ocelí 2000 – 2010

Rok	Nástrojové oceli (NO)						
	Celková výroba NO		Neshodná výroba - zmetky NO				
			Výskyt případů		Podíl na celkové produkci NO		
	kg	relativní vyjádření %	počet případů	relativní vyjádření %	kg	%	relativní vyjádření %
2000	4 278 590	100%	70	100%	95 385	2.23%	100%
2001	3 760 440	88%	51	73%	88 695	2.36%	106%
2002	3 341 350	78%	58	83%	76 195	2.28%	102%
2003	2 559 780	60%	31	44%	22 494	0.88%	39%
2004	3 052 650	71%	53	76%	72 372	2.37%	106%
2005	2 118 960	50%	43	61%	43 440	2.05%	92%
2006	1 682 340	39%	7	10%	9 949	0.59%	27%
2007	2 158 535	50%	3	4%	24 127	1.12%	50%
2008	2 391 923	56%	18	26%	29 300	1.22%	55%
2009	1 568 100	37%	7	10%	23 070	1.47%	66%
2010	2 459 700	57%	4	6%	18 325	0.75%	33%

Výskyt případů neshodných výrobků z nástrojových ocelí, se v letech 2000 až 2005 pohyboval v rozpětí 31 až 70. Po zavedení nového typu kokily v roce 2006 klesl počet těchto případů na 3 až 18.

Na celkové produkci nástrojových ocelí měly neshodné výkovky z nástrojových ocelí v období 2000 až 2005 podíl v rozpětí 0,88 až 2,37 %. Po zavedení nového typu kokily klesl tento podíl na 0,59 až 1,47%.

11. ZÁVĚR

Cílem dizertační práce bylo navržení optimálního tvaru kokily pro odlévání ingotů o hmotnosti 8-10 tun z nástrojových ocelí s maximální eliminací vnitřních necelistvostí a segregací za účelem dosažení vysoké jakosti ingotů a finálních výkovků.

V první části práce byl proveden literární rozbor uvedené problematiky, na základě něhož byly formulovány cíle práce. Těžiště práce spočívá v kapitolách 5 až 10.

S využitím výsledků modelování a simulace procesu odlévání a tuhnutí ingotů z nástrojových ocelí byl navržen optimální tvar kokily resp. ingotu 8K9.2 o hmotnosti 8 900kg. V rámci úprav tvaru ingotu bylo realizováno následující:

- ⇒ v porovnání s původním ingotem 8K8.4 byla snížena jeho štíhlost resp. poměr H/D z hodnoty 1,99 na 1,33
- ⇒ s cílem zvýšit čistotu paty ingotu, snížit riziko vzniku trhlin a prasklin na hranách ingotu a v neposlední řadě zvýšit využití těla ingotu bylo provedeno uzavření patní části kokily
- ⇒ pro zajištění optimálních podmínek tuhnutí ingotu byl realizován návrh nového hlavového nástavce pro ošetření hlavy ingotu
- ⇒ volbou hmotnosti ingotu 8K9.2 (8 900kg) došlo k doplnění chybějící vhodné velikosti mezi ingotem 8K10,0 (9 700kg) a ingotem 8K8.4 (7 600kg).

Pro další práci lze doporučit v oblasti simulace liti a tuhnutí ověření možnosti změny podmínek odlévání a vlivu změn na dosažené kvalitativní parametry ingotu. Za významný výstup ze softwarové simulace lití a tuhnutí pro hodnocení dosažené vnitřní jakosti ingotu lze považovat kritérium dle Niyamy.

Na základě experimentálních a dále pak provozních výsledků lze konstatovat, jak i je zřejmé z tab.19 a 20, že v případě nově navrženého ingotu 8K9.2 v porovnání s ingotem 8K8.4 došlo k výraznému zvýšení vnitřní kvality hotových výkovků z nástrojových ocelí.

V roce 2006 jsem na základě pozitivních výsledků provozních taveb inicioval podání přihlášky chráněného průmyslového vzoru s názvem „Ocelářská kokila pro odlévání velkých ingotů“.

Zvýšené segregace, především uhlíku, v části pod hlavou ingotu poukazují na nezbytnost řešení problematiky ošetření hlavy ingotu. Opatření je třeba realizovat z pohledu výběru vhodných licích prášků, exotermických a isolačních materiálů a stanovení optimálních množství, nezbytných pro správné odlití ingotu i ošetření hlavy ingotu.

Lze předpokládat, že optimalizace podmínek tuhnutí z hlediska ošetření hlavy ingotu, budou znamenat zvýšení chemické homogenity ingotu a potlačení rozsahu segregací zasahující osovou část těla pod hlavou ingotu.

Výsledky zkoumání využité při konstrukci nového typu ingotu 8K9.2 navrhuji, na základě požadavku technologie volné kovárny, aplikovat i při konstrukčních úpravách a návrzích dalších vybraných ingotů ve ŽDAS, a.s. a rozšířit tak sortiment vhodných kokil pro výrobu nástrojových ocelí.

Proces tváření v podmínkách ŽDAS, a.s., při výrobě výkovků z nástrojových ocelí velkého jmenovitého rozměru (průměr výkovku > 200 mm) s využitím zařízení CKV 1800, případně CKV1250 a CKV630 (klasické hornotlaké čtyřsloupové hydraulické kovací lisy se jmenovitou tvářecí silou 18, 12.5 a 6.3 MN) nezajišťuje dosažení dostatečných objemových změn po celém průřezu výkovku, umožňující potlačení a nebo úplné odstranění všech osových vad ingotu. Proto jsem na začátku roku 2007 inicioval jednání technické rady na volné kovárně s tím, že vzhledem k požadavkům na výrobu velkých výkovků z nástrojových ocelí, navrhuji posílit současný lis CKV1800 z 18MN na 22.5MN. Ve stejném roce byl můj návrh realizován.

Provedené práce a získané výsledky provozního sledování a matematického modelování umožnily získat nové původní poznatky v oblasti tuhnutí hmotných ingotů s ohledem na jejich tvar a chemické složení nástrojových ocelí. Výsledky doplňují a rozšiřují stávající úroveň poznání vědního oboru metalurgie, především z hlediska jevů spojených s tuhnutím a krystalizací ingotů z konstrukčních a nástrojových ocelí. Práce dále prokázala možnost využití simulací pro tuhnutí ingotů software MAGMASoft®, který je především určen k simulacím tuhnutí odlitků.

Přínos pro praxi lze spatřovat v zavedení nového tvaru kokily, určené pro výrobu ingotů z nástrojových ocelí, což v konečném důsledku přineslo zvýšení vnitřní kvality ingotů a následně snížení zmetkovitosti při výrobě hmotných výkovků z nástrojových ocelí.

12. SHRNUTÍ

Problematickou, které je věnována hlavní pozornost v dizertační práci, je kvalita ingotů z vybraných druhů nástrojových ocelí, určených pro výrobu velkých výkovků o hmotnosti 8 tun velmi namáhaných nástrojů pro práci za tepla. Příkladem těchto jakostí je Cr-Mo-V-Si ocel dle ČSN419552 nebo ocel dle ČSN419554, případně jejich ekvivalenty dle zahraniční normy DIN17350 jakost oceli X38CrMoV51 nebo X40CrMoV51. Práce řeší problematiku výroby ingotů z těchto ocelí, kde jejich kvalita je jednou ze základních podmínek zvládnutí výroby bezvadných výkovků.

Tato problematika souvisí se sníženými plastickými vlastnostmi u ocelí s vysokým obsahem uhlíku v kombinaci s legujícími prvky, chromem, molybdenem a vanadem. V případě výroby rozměrných výkovků, kdy nelze tvářením zajistit potřebnou deformaci v osově části ingotu, je nutné dosáhnout požadované vnitřní kvality, snížením podílu vnitřních vad v původním polotovaru samotném – v ingotu. Dizertační práce se zaměřuje na možnosti, jak tyto vady v ingotu částečně eliminovat.

Dizertační práce je zaměřena na využití a aplikaci výsledků modelování a simulace procesu odlévání a tuhnutí ingotů z nástrojových ocelí se zaměřením na vnitřní jakost a eliminaci makrosegregací.

Na základě výsledků numerické simulace, provedených v podmínkách softwaru MAGMASoft®, byl realizován návrh nového tvaru kokily s označením 8K9,2. Výsledky numerické simulace lití oceli a tuhnutí ingotu v kokile 8K9,2 ukázaly, proti původnímu ingotu 8K8,4, významné snížení rizika výskytu vad definovaných kritériem Niyama.

Po ověření na experimentálních a dále pak provozních tavných bylo možné konstatovat, že v případě nově navrženého ingotu 8K9.2 v porovnání s ingotem 8K8.4 došlo k výraznému zvýšení vnitřní kvality ingotů z nástrojových ocelí. Všechny zkoušené ingoty 8K9.2 vykazovaly nižší zasažení osově části těla ingotu staženinami a ředinami, přičemž rozsah jejich škodlivosti byl snížen eliminací masivních trhlin nalezených v případě analýz struktury ingotů 8K8.4 a 8K13.0.

13. SUMMARY

The main issue described in the dissertation thesis is the quality of ingots made of selected types of tool steels designed for the manufacture of large 8t forgings of the tools subjected to high stress under hot operating conditions. An example of the above mentioned steel grade is the steel Cr-Mo-V-Si per ČSN 419552 or the steel per ČSN 419554 or their equivalents per the foreign standard DIN 17350 – steel grade X38CrMoV51 or X40CrMoV51. The dissertation thesis deals with the issues concerning the manufacture of ingots from the above steels, where the quality of steels is one of the basic conditions to make sound forgings.

The above issues are related to reduced plastic properties in high-carbon-content steels in combination with alloying elements, chromium, molybdenum and vanadium. In case of production of large forgings where it is not possible to ensure the required deformation in the axial part of an ingot by forming, it is necessary to achieve the required inside quality by reduction of the proportion of internal defects in the original semi-product itself, i.e. in the ingot. The dissertation thesis deals with the possibilities to find a solution to partly eliminate such defects in the ingot.

The dissertation thesis is aimed to the utilization and application of the results of modelling and simulation of the process of casting and solidification of tool-steel ingots with a view to the internal quality and elimination of macro-segregations.

On the basis of the results of numerical simulation performed under the MAGMASoft® software conditions, the design of the new shape of a mould with 8K9.2 designation has been executed. The results of numerical simulation of the process of steel casting and ingot solidification in the mould 8K9.2 have shown that, in comparison with the original ingot 8K8.4, there is a significant decrease of the risk of the occurrence of defects defined by the Niyama criterion.

After verification during experimental and operating heats it was possible to say that in case of the newly designed ingot 8K9.2 there is a considerable improvement in the internal quality of tool-steel ingots in comparison with the ingot 8K8.4. It has been shown that in all tested ingots 8K9.2 there is a lower occurrence of shrinkage cavities and shrinkage porosities in the axial part of the ingot body. The range of their harmfulness was reduced by the elimination of great cracks disclosed in the case of the analyses of the structure of the ingots 8K8.4 and 8K13.0.

14. LITERATURA

- [1] Martínek, L., Balcar, M., Fila, P., Novák, J., Sochor, J., Sochor, L.: Vnitřní struktura ingotu z nástrojové oceli. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2003, s. 117-123.
- [2] Balcar, M., Sochor, L., Železný, R., Fila, P., Martínek, L., Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Vývoj a realizace velkých výkovků nástrojových ocelí. In: FORMING 2007, Podbanské (Slovensko), ISBN 978-80-227-2702-0, s. 42-48.
- [3] YoungDeak, K., JongRae Ch., WonByung, B.: Efficient forging process to improve the closing effect of the inner void on an ultra-large ingot. Journal of Materials Processing Technology 211., 2011, p.1005 – 1013.
- [4] Lesoult, G.: Macrosegregation in steel strands and ingots. Materials and science and engineering, A413-414, 2005, p. 19-29
- [5] Parma, V.: Ocelářství III. VŠB Ostrava, 1981, 192 s.
- [6] Combeau, H., Založnik, M., Hans, S., Richy, P.E.: Prediction of Macrosegregation in Steel Ingots - Influence of the Motion and the Morphology of Equiaxed Grains. Metallurgical and transactions B, volume 40B, June 2009, p. 289-304
- [7] Baoguang, S., Xiuhong, K., Dianzhong, L.: A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots. Journal of Materials Processing Technology 210., 2010, p.703 – 711.
- [8] Chvojka, J.: Vady ingotů. SNTL Praha, 1968, 254 s.
- [9] Šmrha, L.: Tuhnutí a krystalizace ocelových ingotů. SNTL Praha, 1983, 308 s.
- [10] Myslivec, T.: Fyzikálně-chemické základy ocelářství. SNTL Praha, 1971, 445 s.
- [11] Dubovick, W.: Arrest measurements and their application in the investment casting. 2nd. World foundry congress, Dusseldorf, 1960.
- [12] Aymard, J.P., Détrez, P.: Fonderie, 330, č.1, 1974, s. 11-24
- [13] Zhang, Q., Wang, X.: Numerical simulation of influence of casting speed variation on surface fluctuation of molten steel in mold. Journal of iron and steel research, international. 2010, 17(8), s. 15-19
- [14] Shiraiwa, T., Sakamoto, Y., Kobayashi, S., Anezaki, S., Kato, H., Kuwabara, A.: Automatic control of casting speed in ingot casting. Automatica, Volume 17, Issue 4, July 1981, p. 613-618
- [15] Kermanpur, A., Eskandari, M., Purmohamad, H., Soltani, M.A., Shateri, R.: Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation. Materials and design 31., 2010, p. 1096 – 1104
- [16] Shamrei, V.A., Zhuřev, S.I.: New shape of forging ingot for making hollow forged products. Metallurgist, vol.51, Nos. 11-12, 2007
- [17] Wang, L., Shi, W.: Numerical Simulation of Macrosegregation During Steel Ingot Solidification Using Continuum Model. J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 2011, 16(2): 145-148.

- [18] Havlíčková, J.: Využití simulace pro predikci vad a hodnocení vlastností u tlakově litých odlitků z Al slitin. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUTFSI, Ústav strojírenské technologie. 2011. 94 s.
- [19] Radovic, Z., Lalovic, M.: Numerical simulation of steel ingot solidification process. *Journal of Materials Processing Technology* 160, 2005, p.156 – 159.
- [20] Huczala, T., Chmiel, B., Michálek, K., Vrábel, P.: Využití softwaru MAGMASoft® pro návrh geometrie ocelářských kokil a optimalizaci procesu lití a tuhnutí. In: Chvorinovo kolokvium-Tuhnutí a krystalizace kovů. Ostrava, 2009, CD-ROM, ISBN 978-80-248-2056-9
- [21] Korbáš, M., Machovčák, P., Bárta, J., Kovařík, J., Hirsch, F., Slováček, M.: Praktické využití numerické simulace při řešení problémů lití ingotu a jeho dalšího zpracování. In: Chvorinovo kolokvium-Tuhnutí a krystalizace kovů. Ostrava, 2009, CD-ROM, ISBN 978-80-248-2056-9
- [22] Balcar, M. a kol.: Posouzení stávajících technologických postupů výroby ingotů a určení kritických míst. Průběžná zpráva projektu FT-TA/061 Etapa 1. 58 s.
- [23] Balcar, M., Železný, R., Martínek, L., Fila, P., Bažan, J., Kraus, L.: Modelování procesu tuhnutí kovářských ingotů z nástrojové oceli. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2005, s. 99-104, ISBN 80-86840-08-5
- [24] Balcar, M., Železný, R., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L.: Aplikace numerického modelování při vývoji ocelářské kokily. In: Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem, Svratka, 2006, s. 34-40, ISBN 80-02-01848-6.
- [25] Carlson, K.D., Shouzh Ou, Hardin, R., Beckerman, Ch.: Development of New Feeding – Distance Rules Using Casting Simulation: Part I. Methodology. <http://www.engineering.uiowa.edu/~becker/documents.dir/FeedingPart1.pdf>
- [26] Havlíček, F.: Tepelně fyzikální pochody mezi ingotem a kokilou. *Hutnické aktuality* 1. Ročník 10. Praha 1969. 139 s.
- [27] Balcar, M., Sochor, L., Železný, R., Fila, P., Martínek, L., Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Developing and testing a new type-8K mould for tool-steel ingot casting. *Materials and Technology*, 2008, 42/1, s. 33 – 38, ISSN 1580-2949.
- [28] Balcar, M., Železný, R., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L.: The development of chill mould for tool steels using numerical modelling. *Materials and Technology*, 2008, 42/4, s. 183 – 188, ISSN 1580-2949.
- [29] Balcar, M., Železný, R., Sochor, L., Martínek, L., Fila, P., Kraus, L., Bažan, J.: Development of the Ingot mould for tool steels in ZDAS, Inc. *Hutnické listy*, 2010, 3, s. 21-26, ISSN 0018-8069.
- [30] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Novák, J.: Hodnocení mikročistoty dle ČSN 41 0471 a DIN 50 602 oceli 8Cr3SiMoV - tavba 20554 – pozice 1, 2004, 56 s.
- [31] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Novák, J.: Hodnocení mikročistoty dle ČSN 41 0471 a DIN 50 602 oceli 8Cr3SiMoV - tavba 20554 – pozice 2, 2004, 74 s.
- [32] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Novák, J.: Hodnocení mikročistoty dle ČSN 41 0471 a DIN 50 602 oceli 8Cr3SiMoV - tavba 20554 – pozice 3, 2004, 83 s.
- [33] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Novák, J.: Hodnocení mikročistoty dle ČSN 41 0471 a DIN 50 602 oceli 8Cr3SiMoV - tavba 20554 – pozice 4, 2004, 74 s.

- [34] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Novák, J.: Hodnocení mikročistoty dle ČSN 41 0471 a DIN 50 602 oceli 8Cr3SiMoV - tavba 20554 – pozice 5, 2004, 56 s.
- [35] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Novák, J.: Hodnocení makrostruktury a mikrostruktury oceli 8Cr3SiMoV - tavba 20554, 2004, 56 s.
- [36] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Novák, J.: Hodnocení velikosti zrna dle ČSN 41 0462 oceli 8Cr3SiMoV - tavba 20554, 2004, 23 s.
- [37] Martínek, L., Balcar, M., a kol.: Průběžná zpráva - Etapa 1: Posouzení stávajících technologických postupů výroby ingotů a určení kritických míst. Projekt MPO ČR TANDEM FT-TA/061. ŽĐAS, a.s. Žďár nad Sázavou, 2005, 58 s.
- [38] Martínek, L., Balcar, M., Železný R., a kol.: Průběžná zpráva - Etapa 5: Numerická simulace postupu odlévání a tuhnutí ingotu. Etapa 7: Návrh nových tvarů kokil. Projekt MPO ČR TANDEM FT-TA/061. ŽĐAS, a.s. Žďár nad Sázavou, 2005, 41 s.
- [39] Balcar M., Sochor, L., Novák, J.: Hodnocení makrostruktury ingotu 8K8,4 oceli X40CrMoV51 kapilární zkouškou a hlubokým leptáním. Projekt MPO ČR TANDEM FT-TA/061. ŽĐAS, a.s. Žďár nad Sázavou, 2005, 15 s.
- [40] Balcar M., Sochor, L., Novák, J.: Hodnocení makrostruktury výkovků ingotu 8K8,4 oceli X40CrMoV51 kapilární zkouškou a hlubokým leptáním. Projekt MPO TANDEM FT-TA/061. ŽĐAS, a.s. Žďár nad Sázavou, 2005, 18 s.
- [41] Balcar M., Sochor, L., Novák, J.: Hodnocení mikročistoty výkovku z ingotu 8K8,4 oceli X40CrMoV51. Projekt MPO ČR TANDEM FT-TA/061. ŽĐAS, a.s. Žďár nad Sázavou, 2005, 16 s.
- [42] Balcar, M., Sochor, L., Železný, R., Fila, P., Martínek, Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Výsledky ověření nového tvaru kokily typu 8K9,2 pro odlévání ingotů nástrojových ocelí. In: Teorie a praxe výroby a zpracování ocelí, Rožnov pod Radhoštěm, 2007, s. 104-110, ISBN 978-80-86840-32-1.
- [43] Balcar, M., Sochor, L., Železný, R., Fila, P., Martínek, L., Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Verification of the New Mould Type 8K9,2 for Tool Steel Ingot Casting. Acta Metallurgica Slovaca 2010, ročník 13, č. 5, s. 329 – 334. ISSN 1335-1532
- [44] Balcar, M.: Kapilární zkoušky - hodnocení struktury ingotů – ocel X40CrMoV51, tavba 22279 – 22311 – 22381 - 22954, TD 1 – 2 – 3 - 4, ingot. Dokumentace výsledků. 2006. 52 s.
- [45] Balcar, M.: Kapilární zkoušky - hodnocení struktury ingotů – ocel X40CrMoV51 – 8Cr3MoSiV – 90MnCrV8, tavba 26742 – 27332 – 27438, TD 6 – 7 – 8, ingot. Dokumentace výsledků. 2006. 31s.
- [46] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Novák, J.: Hodnocení makrostruktury oceli hlubokým leptáním – ocel X40CrMoV51, tavba 22279 – 22311 – 22381, TD 1 – 2 – 3, ingot. Dokumentace výsledků. 2005. 21 s.
- [47] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Novák, J.: Hodnocení makrostruktury oceli hlubokým leptáním – ocel X40CrMoV51 – 8Cr3MoSiV – 90MnCrV8, tavba 26742 – 27332 – 27438, TD 6 – 7 – 8, ingot. Dokumentace výsledků. 2005. 18 s.
- [48] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Svatoň, J.: Chemická heterogenita ingotu oceli – ocel X40CrMoV51, tavba 22279 – 22311 – 22381, TD 1 – 2 – 3, ingot. Dokumentace výsledků. 2006. 34 s.

-
- [49] Laboratoře ŽĐAS, a.s., Svatoň, J.: Chemická heterogenita ingotu oceli – ocel X40CrMoV51 – 8Cr3MoSiV – 90MnCrV8, tavba 26742 – 27332 – 27438, TD 6 – 7 – 8, ingot. Dokumentace výsledků. 2006. 20 s.

15. PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

15.1 Zahraniční publikace

15.1.1 Články v odborných periodikách

- [1] Fila, P., Martínek, L., Balcar, M., Bažan, J., Adolf, Z.: Evaluation of Super Clean Steels According to the Chemical Composition. *Metalurgija*, 2005, 44(3), s. 183-188, ISSN 0543-5846.
- [2] Balcar, M., Železný, R., Martínek, L., Fila, P., Bažan, J.: Modelling of the solidification process and the chemical heterogeneity of a 26NiCrMoV115 steel ingot. *Materials and Technology*, 2008, 41/3, s. 139 – 144, ISSN 1580-2949.
- [3] Balcar, M., Sochor, L., Železný, R., Fila, P., Martínek, L., Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Developing and testing a new type-8K mould for tool-steel ingot casting. *Materials and Technology*, 2008, 42/1, s. 33 – 38, ISSN 1580-2949.
- [4] Balcar, M., Turecký, V., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L., Bažan, J., Němeček, S., Kešner, D.: Evaluation of properties of rotor forgings made of steel 26NiCrMoV115. *Materials and Technology*, 2008, 42/3, s. 135 – 139, ISSN 1580-2949.
- [5] Balcar, M., Železný, R., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L.: The development of chill mould for tool steels using numerical modelling. *Materials and Technology*, 2008, 42/4, s. 183 – 188, ISSN 1580-2949.
- [6] Stránský, K., Bažan, J., Dobrovská, J., Balcar, M., Fila, P., Martínek, L.: Application of the theory of physical similarity for the filtration of metallic melts. *Materials and Technology*, 2008, 42/4, s. 175 – 178, ISSN 1580-2949.
- [7] Martínek, L., Balcar, M., Fila, P., Stránský, K., Podrábský, T.: Contribution to the evaluation of super clean steel heats. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2005 (Special Issue), 11(2), s.16-24, ISSN-1335-1532.
- [8] Fila, P., Martínek, L., Balcar, M., Bažan, J., Adolf, Z.: Evaluation of super clean steels according to chemical composition. *METALURGIJA*, 2006, 45/3, s. 211, ISSN 0543-5846.
- [9] Fila, P., Balcar, M., Martínek, L.: Opinion of the field of incomplete working costs in connection with some technological electric steel making processes. *METALURGIJA*, 2006, 45/3, s. 257, ISSN 0543-5846.
- [10] Balcar, M., Sochor, L., Železný, R., Fila, P., Martínek, L., Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Verification of the New Mould Type 8K9,2 for Tool Steel Ingot Casting. *Acta Metallurgica Slovaca* 2010, ročník 13, č. 5, s. 329 – 334. ISSN 1335-1532
- [11] Balcar, M., Fila, P., Martínek, L., Vaverka, L., Bažan, J., Horáková, D., Láník, B.: The filtration of liquid steel in casting process. *Acta Metallurgica Slovaca* 2010, ročník 13, č. 5, s. 335 – 338. ISSN 1335-1532

15.1.2 Články ve sbornících z konferencí

- [12] Martínek L., Balcar M., Fila P.: Sekundární metalurgie a její vliv na změnu sortimentu ocelí na odlitky ve ŽDAS, a.s. SPOLUPRÁCA 2004. duben 2004. Tatranská Lomnica, s. 85-91, ISBN 80-8070-231-4.

- [13] Fila, P., Balcar, M., Martínek, L., Vaverka, L., Bažan, J., Láník, B.: Uplatnění keramických filtrů při odlévání ocelových ingotů. In: Preparation of Ceramic Materials, Herlany, 2007, s. 36-39 ISBN 978-80-8073-806-8.
- [14] Balcar, M., Sochor, L., Železný, R., Fila, P., Martínek, L., Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Vývoj a realizace velkých výkovků nástrojových ocelí. In: FORMING 2007, Podbanské (Slovensko), ISBN 978-80-227-2702-0, s. 42-48.
- [15] Balcar, M., Socha, L., Fila, P., Salva, O., Bažan, J., Martínek, L.: Ověření jakosti licí keramiky pro odlévání ingotů. In: IRON & STEELMAKING, Malenovice – Frýdlant nad Ostravicí, 2008, s. 26-34, ISBN 978-80-248-1831-3
- [16] Fila, P., Balcar, M., Svatoň, J., Martínek, L., Švábenský, V.: Vliv způsobu odběru vzorku tekuté oceli na obsah kyslíku. In: IRON & STEELMAKING, Malenovice – Frýdlant nad Ostravicí, 2008, s. 172-176, ISBN 978-80-248-1831-3

15.2 Tuzemské publikace

15.2.1 Články v odborných periodikách

- [17] Balcar, M., Železný, R., Sochor, L., Martínek, L., Fila, P., Kraus, L., Bažan, J.: Development of the Ingot mould for tool steels in ZDAS, Inc. Hutnické listy, 2010, 3, s. 21-26, ISSN 0018-8069.
- [18] Fila, P., Balcar, M., Martínek, L., Šuchmann, P., Krejčík, J. a kol.: Vývoj nových materiálů určených pro kovací zápustky. Kovárenství, 2010, 38, s. 11-14, ISSN 1213-9289
- [19] Fila, P., Balcar, M., Martínek, L., Šuchmann, P., Krejčík, J., Jelen, L., Psík, E.: Development of new types of tool steels designed for forging dies. MM Science Journal, <http://www.mmscience.eu>, December 2010, Number 4, MKČR E 7645, ISSN 1803-1269

15.2.2 Články ve sbornících z konferencí

- [20] Martínek L., Balcar M., Fila P., Stránský K., Podrábský T.: Příspěvek k hodnocení taveb super čistých ocelí. In: Teorie a praxe výroby a zpracování ocelí, Rožnov pod Radhoštěm, 2004, s. 21-38, ISBN 80-85988-94-1
- [21] Martínek L., Balcar M., Fila P., Bažan J., Adolf Z.: Výroba superčistých ocelí v podmínkách ŽDAS, a.s. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2004, CD-ROM, ISBN 80-85988-95-X
- [22] Balcar M., Fila P., Martínek L.: Sekundární metalurgie u ocelí pro odlévání odlitků. In: Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem, Svratka, 2004, s.47-53, ISBN 80-02-01669-6
- [23] Martínek, L., Balcar, M., Fila, P., Svatoň, J., Peřinová, G., Novák, J., Sochor, L., Bažan, J., Adolf, Z., Kraus, L.: Zkušenosti s výrobou vysoce čistých ocelí pro energetická zařízení. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2005, s. 82-90, ISBN 80-86840-08-5
- [24] Balcar, M., Železný, R., Martínek, L., Fila, P., Bažan, J., Kraus, L.: Modelování procesu tuhnutí kovářských ingotů z nástrojové oceli. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2005, s. 99-104, ISBN 80-86840-08-5

-
- [25] Balcar, M., Martínek, L. Fila, P., Sochor L., Novák, J., Turecký, V., Matal, O.: Vývoj a ověření technologie výroby oceli pro komponenty parního generátoru. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2005, s. 70-75, ISBN 80-86840-08-5
- [26] Balcar, M., Martínek, L. Fila, P., Sochor L., Novák, J., Turecký, V., Matal, O.: Vývoj a ověření technologie výroby oceli pro komponenty parního generátoru, In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2005, CD-ROM, ISBN 80-86840-13-1.
- [27] Martínek L., Balcar M., Fila P., Bažan J., Adolf Z.: Problematika využití primárních zdrojů železa v elektrické obloukové peci při výrobě vysoce čistých ocelí pro energetická zařízení. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2005, CD-ROM, ISBN 80-86840-13-1.
- [28] Fila, P., Balcar, M., Tomandl, R., Martínek, L., Šípek, L.: Žárověbetony v sekundární metalurgii. In: Hutní keramika, Rožnov pod Radhoštěm, 2005, s. 56–59, ISBN 80-86840-17-4.
- [29] Fila, P., Balcar, M., Martínek, L.: Náhled na oblast neúplných vlastních nákladů ve vazbě na některé technologické postupy výroby elektrooceli. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2006, s. 257–261, ISBN 80-86840-08-05.
- [30] Balcar, M., Železný, R., Martínek, L., Fila, P., Bažan, J.: Modelování procesu tuhnutí a chemická heterogenita ingotu oceli jakosti 26NiCrMoV115. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2006, CD-ROM, ISBN 80-86840-18-2.
- [31] Balcar, M., Železný, R., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L.: Aplikace numerického modelování při vývoji ocelářské kokily. In: Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem, Svratka, 2006, s. 34-40, ISBN 80-02-01848-6.
- [32] Balcar, M., Fila, P., Martínek, L., Novák, J., Bažan, J., Husar, J., Horáková, D.: Výzkum vlivu doby argonování na čistotu oceli po zpracování procesem VD. In: Teorie a praxe výroby a zpracování ocelí, Rožnov pod Radhoštěm, 2007, s. 48-53, ISBN 978-80-86840-32-1.
- [33] Balcar, M., Sochor, L., Železný, R., Fila, P., Martínek, L., Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Výsledky ověření nového tvaru kokily typu 8K9,2 pro odlévání ingotů nástrojových ocelí. In: Teorie a praxe výroby a zpracování ocelí, Rožnov pod Radhoštěm, 2007, s. 104-110, ISBN 978-80-86840-32-1.
- [34] Balcar, M., Turecký, V., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L., Bažan, J., Němeček, S., Kešner, D.: Hodnocení vlastností výkovek rotorů z oceli 26NiCrMoV115. In: Teorie a praxe výroby a zpracování ocelí, Rožnov pod Radhoštěm, 2007, s. 164-169, ISBN 978-80-86840-32-1.
- [35] Balcar, M., Martínek, L., Fila, P., Novák, J., Bažan, J., Skobir, D., A., Godec, M.: Současný stav a perspektivy v technologii výroby super čistých ocelí ve ŽŽAS, a.s. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2007, CD-ROM, ISBN 978-80-86840-33-8.
- [36] Balcar, M., Fila, P., Martínek, L., Novák, J., Bažan, J., Husar, I., Horáková, D., Němeček, S., Podaný, P.: Výzkum vlivu doby argonování na čistotu oceli po zpracování procesem VD. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2007, CD-ROM, ISBN 978-80-86840-33-8.

-
- [37] Sochor, L., Balcar, M., Železný, R., Fila, P., Martínek, L., Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Výsledky ověření nového tvaru kokily typu 8K9,2 pro odlévání ingotů nástrojových ocelí. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2007, CD-ROM, ISBN 978-80-86840-33-8.
- [38] Balcar, M., Turecký, V., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L., Bažan, J., Němeček, S., Kešner, D.: Hodnocení vlastností výkovků rotorů z oceli 26NiCrMoV115. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2007, CD-ROM, ISBN 978-80-86840-33-8.
- [39] Balcar, M., Turecký, V., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L., Bažan, J., Němeček, S., Kešner, D.: Hodnocení vlastností výkovků rotorů z oceli 26NiCrMoV115. In: Nové technologie kování, Nové Město na Moravě, 2007, CD-ROM, ISBN 978-80-239-8938-0.
- [40] Balcar, M., Sochor, L., Železný, R., Fila, P., Martínek, L., Kraus, L., Kešner, D., Bažan, J.: Výsledky ověření nového tvaru kokily typu 8K9,2 pro odlévání ingotů nástrojových ocelí. In: Nové technologie kování, Nové Město na Moravě, 2007, CD-ROM, ISBN 978-80-239-8938-0.
- [41] Fila, P., Balcar, M., Martínek, L., Vaverka, L., Bažan, J., Láník, B.: Uplatnění keramických filtrů při odlévání ocelových ingotů. In: Hutní keramika, Rožnov pod Radhoštěm, 2007, s. 123-127, ISBN 978-80-86840-37-6.
- [42] Balcar, M., Fila, P., Martínek, L., Bažan, J.: Chemická a metalografická čistota oceli. In: Celostátní školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a litiny s kuličkovým grafitem, Svatka, 2007, s. 46-54, ISBN 978-80-02-01966-4.
- [43] Fila, P., Balcar, M., Svatoň, J., Martínek, L., Švábenský, V.: Vliv způsobu odběru vzorku tekuté oceli na obsah kyslíku. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2008, s. 17–21, ISBN 978-80-86840-39-0.
- [44] Balcar, M., Socha, L., Salva, O., Fila, P., Bažan, J., Martínek, L.: Ověření jakosti licí keramiky pro odlévání ingotů. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2008, CD-ROM, ISBN 978-80-254-1987-8.
- [45] Fila, P., Balcar, M., Švec, R., Martínek, L.: Vliv způsobu odběru vzorku tekuté oceli na obsah kyslíku. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2008, CD-ROM, ISBN 978-80-254-1987-8.
- [46] Balcar, M., Fila, P., Martínek, L., Bažan, J., Láník, B., Šmejkal, V.: Uplatnění keramických filtrů při odlévání ocelových ingotů. In: METAL, Hradec nad Moravicí, 2008, CD-ROM, ISBN 978-80-254-1987-8.
- [47] Balcar, M., Fila, P., Martínek, L., Bažan, J., Láník, B., Šmejkal, V.: Uplatnění keramických filtrů při odlévání ocelových ingotů. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2008, s. 68–75, ISBN 978-80-86840-39-0.
- [48] Balcar, M., Havelková, L., Sochor, L.: Vliv stopových prvků na houževnatost oceli. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2009, s. 10–15, ISBN 978-80-87294-01-7.
- [49] Balcar, M., Svatoň, J., Novák, J., Fila, P., Martínek, L.: Příspěvek k soudobému trendu omezení koncentrace kyslíku v oceli. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2010, s. 31–38, ISBN 978-80-87294-14-7.

- [50] Socha, L., Bažan, J., Martínek, L., Fila, P., Balcar, M., Lev, P.: Vliv působení roztavené oceli na žárovzdorný materiál s rozdílnou pórovitostí. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli, Rožnov pod Radhoštěm, 2010, s. 205–209, ISBN 978-80-87294-14-7.
- [51] Fila, P., Balcar, M., Martínek, L.: Experimentální rafinační pánev pro zpracování taveb o hmotnosti 8 až 12 tun. In: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli. Rožnov pod Radhoštěm, 2010, s. 226–231, ISBN 978-80-87294-14-7.
- [52] Balcar, M., Novák, J., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L.: Tepelné zpracování a vlastnosti oceli ASTM A694 F60. 26. celostátní konference se zahraniční účastí: Teorie a praxe výroby a zpracování oceli. 6. – 7. dubna 2011. Rožnov pod Radhoštěm. TANGER s.r.o. Ostrava. Sborník přednášek. ISBN 978-80-87294-21-5
- [53] Balcar, M., Novák, J., Sochor, L., Fila, P., Martínek, L.: Tepelné zpracování a vlastnosti oceli ASTM A694 F60. 20. mezinárodní konference metalurgie a materiálů METAL 2011. 18. – 20. května 2011. Brno, Hotel Voroněž, TANGER s.r.o. Ostrava. CD-ROM. ISBN 978-80-87297-22-2

15.3 Chráněné průmyslové vzory

- | | | |
|-----|------------------|---|
| [1] | číslo přihlášky: | 2006-18318 |
| | číslo zápisu: | 17175 |
| | název: | Ocelářská kokila pro odlévání velkých ingotů |
| | MPT: | B 22 D 7/06 |
| | | |
| [2] | číslo přihlášky: | 2009-21337 |
| | číslo zápisu: | 19949 |
| | název: | Nástrojová ocel s vysokou odolností proti opotřebení, určená pro práci za tepla |
| | MPT: | C 22 C 38/22, C 22 C 38/24 |
| | | |
| [3] | číslo přihlášky: | 2009-21339 |
| | číslo zápisu: | 19950 |
| | název: | Nástrojová ocel s vysokou houževnatostí, určená pro práci za tepla |
| | MPT: | C 22 C 38/22, C 22 C 38/24, C 22 C 38/26 |
| | | |
| [4] | číslo přihlášky: | 2009-21340 |
| | číslo zápisu: | 19951 |
| | název: | Nástrojová ocel s vysokou houževnatostí a odolností proti opotřebení, určená pro práci za tepla |
| | MPT: | C 22 C 38/22, C 22 C 38/24, C 22 C 38/26 |
| | | |
| [5] | číslo přihlášky: | 2009-21684 |
| | číslo zápisu: | 20300 |
| | název: | Nástrojová ocel s vysokou prokalitelností a odolností proti opotřebení, určená pro práci za tepla |
| | MPT: | C 22 C 38/22, C 22 C 38/24 |

15.4 Řešené projekty

- [1] **Výzkum, vývoj a optimalizace nové technologie výroby a odlévání oceli pro velké volné výkovky.**
Číslo projekt : FT-TA/061
Řešení projektu : 2004 – 2006
Řešitel projektu : ŽĐAS, a.s.
Spoluřešitel : COMTES FHT a.s., VŠB TU Ostrava
- [2] **Výzkum a vývoj moderní nástrojové oceli pro tvářecí nástroje.**
Číslo projekt : FT-TA3/091
Řešení projektu : 2006 – 2009
Řešitel projektu : KOVÁRNA VIVA Zlín, s.s r.o.
Spoluřešitel : ŽĐAS, a.s., VÍTKOVICE Výzkum a vývoj, s r.o., SVÚM, a.s., COMTES FHT a.s.
- [3] **Mikrolegované oceli s optimalizovanými parametry mechanických vlastností.**
Číslo projekt : OE08009 (EUREKA)
Řešení projektu : 2008 – 2011
Řešitel projektu : ŽĐAS, a.s.
Spoluřešitel : COMTES FHT a.s., VŠB TU Ostrava
- [4] **Produkce progresivních ocelí pro energetiku a chemický průmysl.**
Číslo projekt : FR-TI1/222
Řešení projektu : 2009 – 2012
Řešitel projektu : ŽĐAS, a.s.
Spoluřešitel : COMTES FHT a.s., VŠB TU Ostrava